

平成27年度 修士論文

振動発電用圧電デバイスの形状効果に対する実験解析

指導教員 橋本 誠司 准教授

群馬大学大学院理工学府 理工学専攻
電子情報・数理教育プログラム

坂本 森太郎

振動発電用圧電デバイスの形状効果に対する実験解析

目次

第1章	序論	3
1.1	研究背景	3
1.2	研究目的	4
第2章	汎用圧電素子での発電特性試験	5
2.1	振動発電用 PZT に関して	5
2.2	汎用圧電素子での発電特性試験	6
2.2.1	発電デバイスの製作と発電特性試験	6
2.2.2	システム同定実験	7
2.2.3	システム同定によるモデル化	11
2.2.4	質点デバイスに対するシステム同定試験結果	16
2.2.5	応力分布を改善した 2 質点デバイスの製作	20
第3章	圧電素子の製作と発電特性試験	22
3.1	片持ち梁式圧電素子に対する応力解析	22
3.2	発電特性基礎試験	27
3.3	エネルギー回生効率試験	30
3.4	エネルギー回生効率試験結果	33
第4章	繰り返し荷重による耐久試験	40
4.1	繰り返し荷重試験手順	40
4.2	静荷重試験による校正式の導出	41
4.3	結線位置による出力電圧計測試験	43
4.3.1	健全なデバイスにおける結線位置による出力電圧計測試験	43
4.3.2	破壊したデバイスにおける結線位置の検証	45
4.4	繰り返し荷重試験	48
4.4.1	繰り返し荷重試験構成	48
4.4.2	繰り返し荷重試験結果	50
4.5	自動車振動加振による歪み計測試験	54
4.5.1	自動車振動について	54
4.5.2	自動車振動加振試験構成	56
4.5.3	自動車振動加振試験結果	58
第5章	まとめ	60

質疑応答	61
参考文献	62
発表論文	64
謝辞	64

第 1 章 序論

1.1 研究背景

現在の社会はエネルギーの大量消費により支えられている。エネルギー供給源の大部分を化石燃料が占めているが、化石燃料にはおおきな問題が二つ存在する。一つは埋蔵量に限りがあるということである。化石燃料はあと数十年で枯渇すると言われている中、年々消費量は増加しており枯渇がさらに早まることが予想されている。もう一つは化石燃料を使用する際に発生する温室効果ガスによる地球環境への影響である。化石燃料の大量消費による二酸化炭素の急激な増加で地球温暖化が進み、異常気象や海面上昇などの様々な環境問題が引き起こされている。これを解決するため、2050 年までに温室効果ガス排出量を 50% 削減するという目標が国際政治課題となっている。この目標を達成するためには、先進国を筆頭に世界中の国々がこの問題に取り組むことが重要であることは明らかである。日本としても 2050 年までに現状から 60%~80%の削減を行う計画⁽¹⁾であり、低炭素社会づくりを推進することが不可欠である。

このような背景から、温室効果ガスを排出しない先端低炭素化技術開発が急務となっている。その一つとして、二酸化炭素を排出しないグリーンエネルギーによるエネルギーハーベスティング技術が注目されている。太陽光、風力、地熱、振動発電などが挙げられるが、このうち太陽光や風力発電は研究が進められ、実用化がなされている。それに対し、振動発電技術は研究が緒についたばかりの発展途上の分野である。しかし、現在の地球上には自動車振動のような無駄な振動に溢れており有用な実用先は多く存在する。2013 年度における日本の二酸化炭素排出量の約 2 割は運輸関係が占めており⁽²⁾、そのうちの約 85%にあたる 1.9 億 t もの二酸化炭素が自動車から排出されている。このことから、地球温暖化問題や化石燃料の枯渇などの問題に歯止めをかけることに対し、振動発電のような循環型のエネルギーハーベスティング技術が重要であることは明らかである。

これまでの研究では振動エネルギーに着目し、自動車の走行中に発生する振動エネルギーを圧電素子により電気エネルギーに回生するデバイスの開発を行ってきた⁽³⁾。圧電素子を用いた発電デバイスの実用例の 1 つに「床発電」⁽⁴⁾⁽⁵⁾がある。これは床に発電デバイスを敷き詰め、人が上を歩くことにより発生する荷重や振動を利用し発電するもので、照明などに利用されている。また、より身近な事例では株式会社村田製作所の「圧電素子による自己発電スイッチ」がある。スイッチを押す力により圧電素子振動させ、電気エネルギーを得る構造である。これにより電池レスのリモコンスイッチが実現できる。本研究ではこのような振動発電技術を自動車振動に適用し、自動車自身でエネルギーを回生することにより燃費向上を図る。これにより低炭素社会の実現へ貢献することを目標としている。

1.2 研究目的

本研究は、熱として散逸する自動車振動のエネルギーを電気エネルギーとして回生するデバイスの開発を行うことが目的である。前節で示した通り、自動車には走行中やアイドリング中などに多くの振動が存在しているが、現状ではショックアブソーバーなどで吸収し熱エネルギーとして空気中に放出している。この振動エネルギーを回生することができれば直接燃費の向上につながる。本研究では、発電素子にはピエゾ式の素子を用いる。ピエゾ素子を用いるメリットは、構造がシンプルであること、軽量であること、大量生産により安価で入手できることが挙げられる。また、磁気を介さない発電システムであるため、他の計器やデバイスに悪影響を与えないことも利点である。

ピエゾ式の圧電素子を用いた振動発電の課題として、まず発電能力が低いことが挙げられる。製造コストを上回る発電量が得られなければならないため、出力レベルの向上と恒久的な発電性能を持たせることが必要となる。また、自動車振動をターゲットにしているため長期間振動にさらされる環境を考慮する必要がある。そのため、長期間使用しても破壊しない十分な耐久値を素子や構造体に設定しなければならない。一般的に鋼のような材料は常温で引っ張れば大きく伸び、かつ大きく絞られた後破壊する。これに対し圧電セラミック材料はほとんど変形せずに疲労限度を超えたところで脆性破壊⁶⁾と呼ばれる破壊を起こす。このため圧電素子が脆性材料であるということ考慮し、構造設計をする必要があるのは明白である。以上の点を考慮し、本研究では、市販されている汎用の圧電素子を使用し、振動モードに伴う応力分布と発電特性の検証を行う。その結果に基づき製作した発電デバイスの応力分布による発電効率の検証と、耐久性に対する検証法の提案、評価を行う。

第 2 章 圧電素子形状の検討

2.1 振動発電用 PZT に関して

振動発電デバイスの製作に先立ち、圧電素子に使用されている PZT という材料について説明する。この章では圧電素子の形状を考察し、振動発電に最適な圧電素子を開発することを目的としている。

PZT とはチタン酸ジルコン酸鉛の略称でありペロプスカイト構造を持つ圧電セラミックの一種である。圧電セラミックの大きな特徴は圧電効果を持つことである。具体的に圧電効果とは、圧電セラミックに加えられた歪により結晶内の電子や正負イオンが変位することで分極が起き、電気エネルギーが生じる現象である。身近なものとしてはライターの着火装置やスピーカー、センサなどに利用されている。

PZT は強誘電体のチタン酸鉛(PbTiO_3)と反強誘電体のジルコン酸鉛(PbZrO_3)の固溶体で成分は $[\text{Pb}(\text{Zr-Ti})\text{O}_3]$ である。PZT のキュリー点は両者の混合比によって異なるが、およそ 320°C 付近にありキュリー点以下に転移点はなく安定である。キュリー点とは、ペロプスカイト構造を持つ強誘電体結晶における結晶構造の相転移点である。つまり、圧電セラミックは高温では自発分極を持たないが、温度がキュリー点よりも下がると自発分極を生ずるという特性を持っている。この特性により、圧電素子を利用した発電デバイスを開発する際は設置個所に応じてキュリー点以上の温度にならない様な処置を施す必要がある。また、比較的容易に十分な分極が可能のため、高い圧電係数を持つ圧電セラミックを作ること、混合比を変えることにより機械的 Q 値(共振の鋭さ)をコントロールすることができるといったメリットを持っている。以上のことから PZT を使用する。

また、圧電セラミック全般に言えるデメリットとして、発電効率の良い周波数帯域が狭く使用が限定的になってしまうこと、脆性材料であるため耐久性が低いこと、そして発電電力が小さいことが挙げられる。圧電素子による発電デバイスの開発にはこのようなデメリットを改善する必要がある。以下では主として、発電電力の改善、耐久性の向上について述べる。

2.2 汎用圧電素子での発電特性試験

2.2.1 発電デバイスの製作と発電特性試験

圧電素子の開発に先立ち、市販品の **PZT** を使用し発電特性と応力についての相関性について調べる。本実験では、アクチュエータ用に販売されている **LPD3713X** を使用した。使用したバイモルフ型圧電素子の寸法と仕様を図 2.1 と表 2.1 に示す。バイモルフ型圧電素子とは、2 枚の圧電素子を金属板の両面に貼りあわせた構造の圧電素子である。アクチュエータとしては比較的大きめの変位を得る場合に用いられる。2 枚の圧電素子のそれぞれに差動的な電圧を加えると伸縮方向が反対になるため反りが発生する。片持ち梁構造にすると先端が変位する性質を利用して位置決め素子として使用できる。

様々な振動モード⁽⁷⁾によるモード形状での発電特性⁽⁸⁾と応力分布を比較するため、**PZT** をアルミ板に張り付け、おもりをつけた質点デバイスとして検証を行う。製作したデバイスは、図 2.2 に示した 1 質点デバイスと図 2.3 に示した 2 質点デバイスである。以下、図 2.3 に示した 2 質点デバイスを 2 質点デバイス(A)と呼ぶこととする。

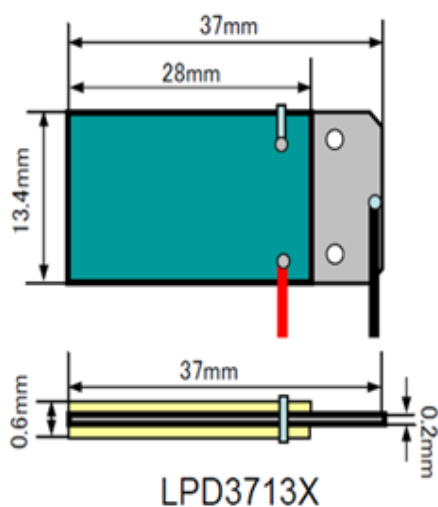


図 2.1 バイモルフ圧電素子の寸法

表 2.1 バイモルフ圧電素子の仕様

	LPD3713X
変位量	150 μ m at 70V
静電容量	110nF \pm 20%
誘電損失(tan δ)	\leq 3.0%
絶縁抵抗	\geq 100M Ω
形状	37 \times 13.4 \times 0.6mm

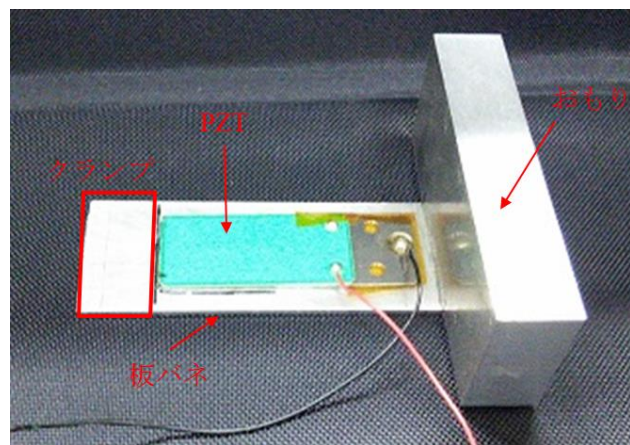


図 2.2 1 質点デバイス

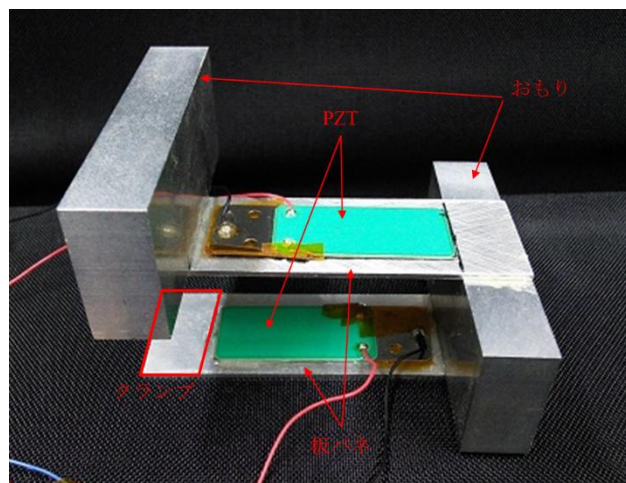


図 2.3 2 質点デバイス(A)

2.2.2 システム同定試験

拘束面ならびに各質点に加速度センサを配置し、加振機によりデバイスを鉛直方向に加振させ、振動計測を行った。PZT の出力電圧および拘束面の加速度、質点の加速度を加速度センサにより測定する。入力信号を 1 質点、2 質点共通で拘束面のベース加速度信号 u_g [G]とする。出力信号として、1 質点デバイスでは質点での加速度 u_1 [G]、PZT の出力電圧 v_p [V]、2 質点デバイスでは 1 層の質点での加速度 u_1 [G]、PZT の出力電圧 v_{p1} [V]、2 層の質点での加速度を u_2 [G]、PZT の出力電圧 v_{p2} [V]としてシステム同定法⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾より周波数特性を同定する。

システム同定試験の実験構成を図 2.4 に、装置写真を図 2.5 に示す。また、使用した加速度センサを図 2.6 と図 2.7、その仕様を表 2.2 にそれぞれ示す。

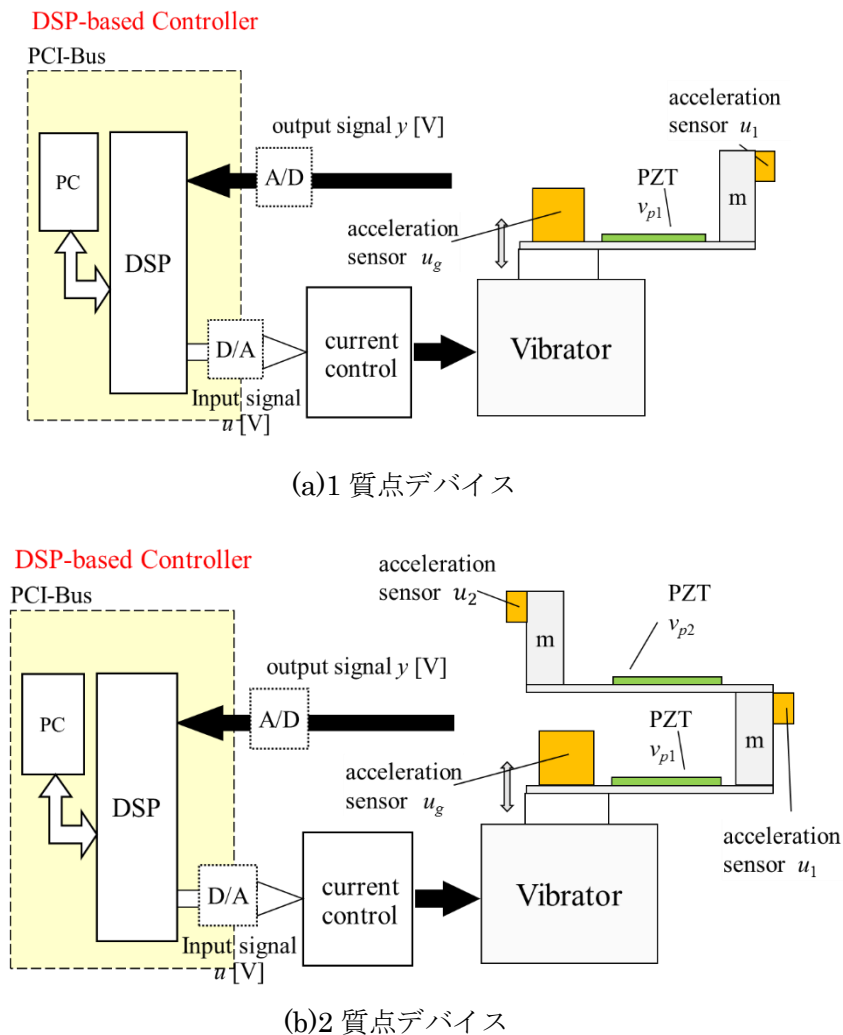
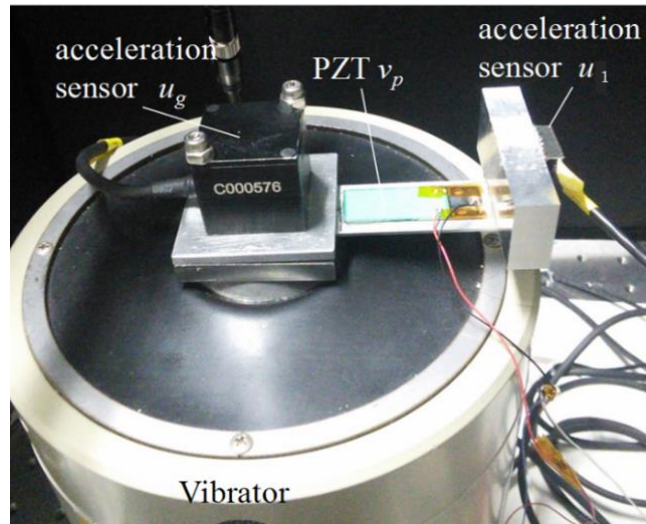
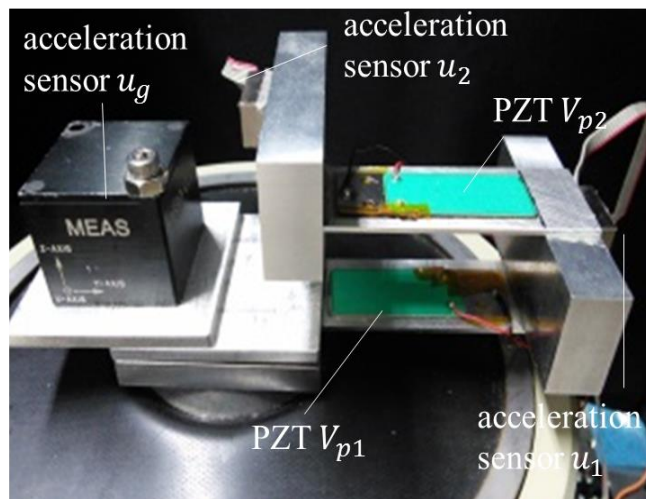


図 2.4 システム同定実験の試験構成



(a)1 質点デバイス



(b)2 質点デバイス

図 2.5 加振実験の試験装置



図 2.6 拘束面の加速度センサ

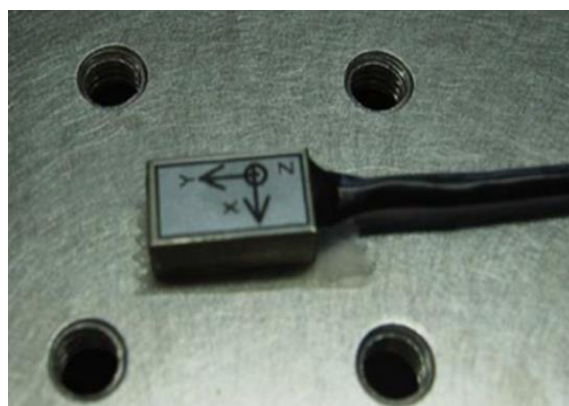


図 2.7 各質点の加速度センサ

表 2.2 加速度センサの仕様

	拘束面の加速度センサ	各質点の加速度センサ
検出軸	3軸	3軸
検出範囲	$\pm 20 \text{ G}$	$\pm 2 \text{ G}$
感度	0.1 V/G	1 V/G
検出周波数	DC～1500 Hz	DC～80 Hz (z軸のみ～20 Hz)
電源電圧	12 V	5 V
質量	40 g	3 g

2.2.3 システム同定によるモデル化

多モード振動発電デバイスの数式モデルを求めるためにシステム同定法⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を用い、モデルを導出する。システム同定は実システムに対する実験によって取得された入力データに基づいて、与えられたモデルの集合から実システムを最も近似するモデルを求める方法である。

- [1] 入出力データの取得、処理
- [2] データに基づき離散モデルを作成
- [3] モデルから制御対象のゲイン、極、零点を導出
- [4] モデルの妥当性の評価

以上がシステム同定の手順となる。

またシステム同定試験にあたり、ARX モデルを用いた。以下に ARX モデルについて記述する。

ARX モデル

システムの入出力関係が差分方程式

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_{n_a} y(k-n_a) = b_1 u(k-1) + \dots + b_{n_b} u(k-n_b) + w(k) \quad (2.1)$$

の場合を考える。

このときモデルを記述するパラメータから構成されるベクトルを

$$\theta = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}]^T \quad (2.2)$$

入力データのベクトルを

$$\varphi(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]^T \quad (2.3)$$

と定義したとき、出力が

$$y(k) = \theta^T \varphi(k) + w(k) \quad (2.4)$$

と表せるモデルである。

ここで 2 つの多項式

$$A(p) = 1 + a_1 p^{-1} + \dots + a_{n_a} p^{-n_a} \quad (2.5)$$

$$B(p) = b_1 p^{-1} + \dots + b_{n_b} p^{-n_b} \quad (2.6)$$

を導入する。ただし $A(p)$ と $B(p)$ は既約なシフトオペレータ p の多項式である。すると(2.1)式は

$$A(p)y(k)=B(p)u(k)+w(k) \quad (2.7)$$

と書き直される。このように記述されるモデルを、**ARX(Auto-Regressive eXogeneous)**モデルといい、システム同定においてしばしば利用される重要なモデルである。また、**ARX** モデルは後述する最小二乗法にとって都合のよいモデルであるため、最小二乗モデルと呼ばれることもある。

ARX モデルの一段先予測値について示す。まず、離散時間 **LTI** システムの一般的な表現は次のようになる。

$$y(k)=G(p)u(k)+H(p)w(k) \quad (2.8)$$

ここで、離散時間 **LTI** モデルにおける一段先予測誤差の定理を示す。

(2.8)式で定義した離散時間 **LTI** モデルにおいて、時刻 $(k-1)$ までに測定された入出力データに基づいた出力 $y(k)$ の一段先予測値 $\hat{y}(k|\theta)$ は

$$\hat{y}(k|\theta)=[1-H^{-1}(p,\theta)]y(k)+H^{-1}(p,\theta)G(p,\theta)u(k) \quad (2.9)$$

で与えられる。ただし、 θ はモデルを記述するパラメータより構成されるベクトルである。このことから、**ARX** モデルの一段先予測値は

$$\hat{y}(k|\theta)=B(p)u(k)+[1-A(p)]y(k)=\theta^T\varphi(k) \quad (2.10)$$

となる。**ARX** モデルは一段先予測値が θ に関して線形な関係式で記述できる。このため、**ARX** モデルは線形回帰モデルとも呼ばれる。

システム同定法

モデルのベクトル θ を求めるにあたって用いた方法は最小二乗法 (Least-Squares method) である。以下にその手法を記述する。

最小二乗法は、評価規範

$$J_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon^2(k, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{y(k) - \theta^T \varphi(k)\}^2 \quad (2.11)$$

を最小化する θ を求める。

ここで

$$R(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varphi(k) \varphi^T(k) \quad (2.12)$$

$$f(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y(k) \varphi(k) \quad (2.13)$$

$$c(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y^2(k) \quad (2.14)$$

として式(2.11)を計算すると

$$J_N(\theta)=c(N)-2\theta^T f(N)+\theta^T R(N)\theta \quad (2.15)$$

となる。

ここで例として未知のパラメータが1つの場合、式(2.15)中の $\theta, R(N), f(N), c(N)$ はすべてスカラになり、それぞれ x, r, f, c とおく。すると式(2.15)は2次方程式となり、 $r > 0$ であるならば $J_N(N)$ は下に凸となるためその最小値は次式によって簡単に導出できる。

$$\frac{d}{dt}J_N(x)=rx^2-2fx+c \quad (2.16)$$

従って $r=f/r$ つまり $\hat{x}=f(N)/R(N)$ であるとき $J_N(N)$ は最小値をとる。

一方、未知のパラメータが2つ以上の場合、基本的な考え方は同じで式(2.16)の2次関数が式(2.15)の2次形式となる。また下に凸であるための条件が、行列 R が正定値行列、つまり逆行列が存在するという条件に対応する。

実験条件

システム同定実験の条件を以下に記述する。

同定対象

同定対象である1質点、2質点デバイスに使用した板バネとおもりのパラメータを表2.3に示す。

表 2.3 デバイスパラメータ

板ばねの長さ	60 mm
板ばねの幅	20 mm
板ばねの厚さ	1 mm
おもりの重さ	28 g

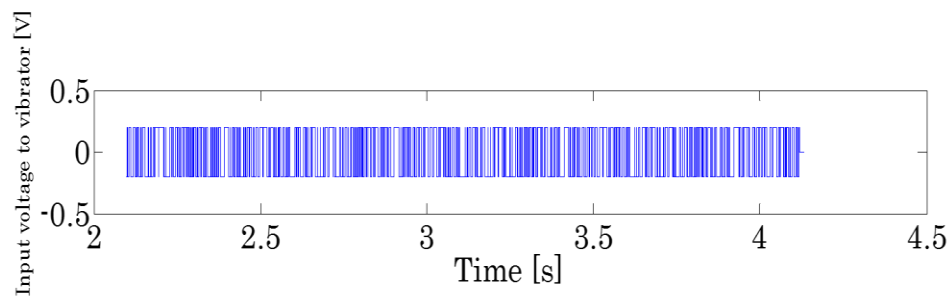
実験条件

表 2.4 に試験条件を示した。入力信号である M 系列信号と、それによる加振機のベース加速度の一例を図 2.8 に、その拡大図を図 2.9 に示した。

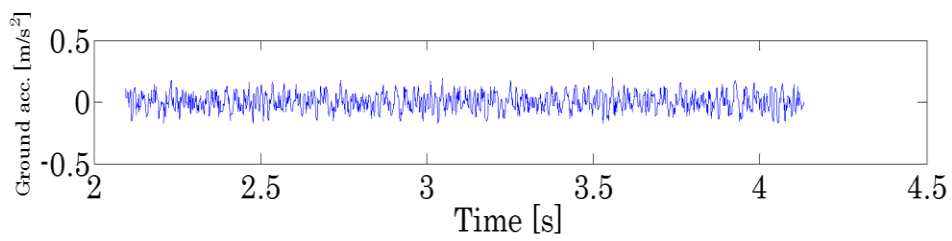
表 2.4 システム同定試験条件

試験条件	
加振軸	鉛直方向
加振器	EMIC512-A(電流制御アンプ付き)
入力信号	M 系列信号(周期 255)
入力振幅	0.2 V
加振時間	2.04 s(1020 サンプル : 4 周期分)
サンプリング時間	2 ms
同定条件(1 質点デバイス)	
同定モデル	ARX モデル
次数決定法	クロスバリデーション
同定入力信号	デバイスのベース(加振器)加速度 u_g [m/s ²]
同定出力信号 1	デバイスの質点加速度 u_1 [m/s ²]
同定出力信号 2	開放出力電圧 V_p [V]
同定条件(2 質点デバイス)	
同定モデル	ARX モデル
次数決定法	クロスバリデーション
同定入力信号	デバイスのベース(加振器)加速度 u_g [m/s ²]
同定出力信号 1	デバイスの 1 層質点加速度 u_1 [m/s ²]
同定出力信号 2	デバイスの 1 層質点加速度 u_2 [m/s ²]
同定出力信号 3	1 層開放出力電圧 V_{p1} [V]
同定出力信号 4	2 層開放出力電圧 V_{p2} [V]

以下にクロスバリデーションについて示す。同定試験により収集されたデータをモデル構築用のデータセットとモデル検証用のデータセットに分けてモデル構造を決定するクロスバリデーション法を用いた。データの分け方には様々な方式があるが今回の実験では全データを半分に分けてモデル及び次数の決定、その検証を行った。クロスバリデーションは有効な方法であるが、パラメータの推定に全データの半分しか利用できないため推定精度が劣化するという問題をもつ。

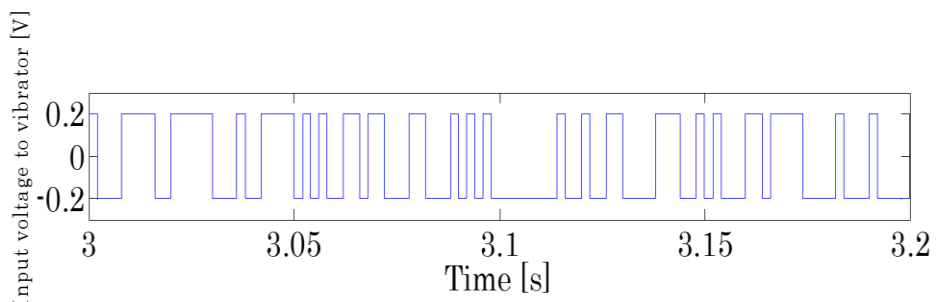


(a)入力信号

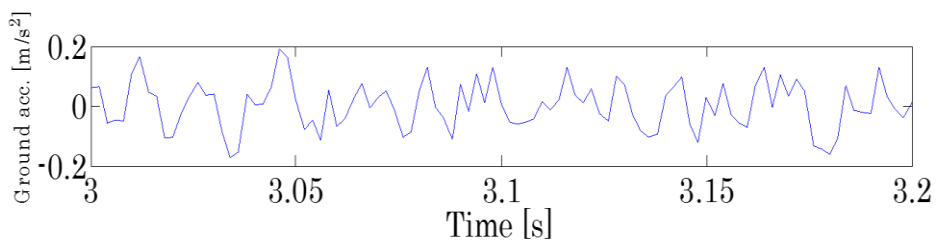


(b)出力加速度

図 2.8 入力信号とベース加速度



(a)入力信号



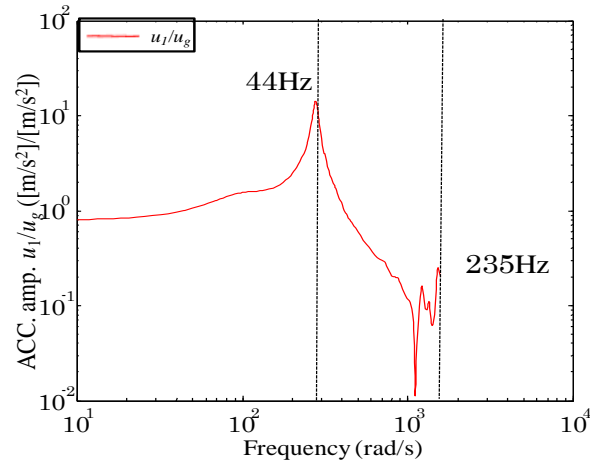
(b)出力加速度

図 2.9 入力信号とベース加速度(図 2.8 の拡大図)

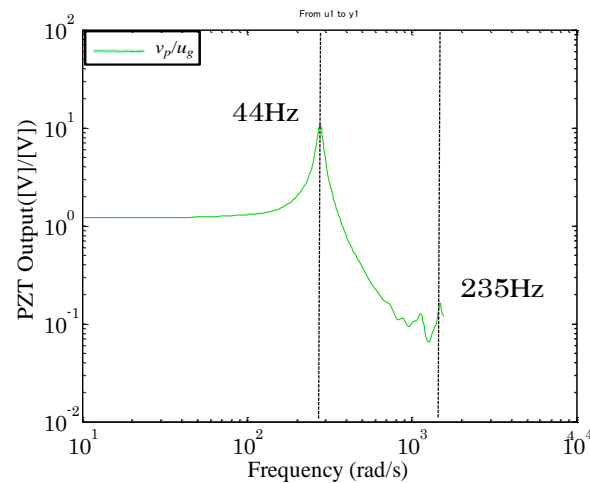
2.2.4 質点デバイスに対するシステム同定試験結果

前節で構築した、市販されている汎用バイモルフ型圧電素子を使用した 1 質点と 2 質点デバイス(A)のシステム同定試験結果を以下に示す。本節ではシステム同定法にて得られた 1 質点、2 質点デバイスの加速度、発電特性と、シミュレーションによって得られたモード形状、応力分布を比較することによって発電に大きく寄与する要素を考察する。

1 質点デバイスのシステム同定試験結果を図 2.10 に示した。これにより 1 質点デバイスには、1 次モードが 44 Hz、2 次モードが 235 Hz である 2 つのモードが存在することを確認した。また、出力は加速度、出力開放電圧共に 1 次モードで最大となることがわかる。それに対し、2 次モードの出力は非常に小さいため、発電に有効なモードではないことが考えられる。この 2 つのモードに対して、シミュレーションソフトによる Finite Element Method(FEM)⁽¹⁵⁾解析を行い、応力分布による違いを考察する。



(a) 加速度特性



(b) 出力開放電圧

図 2.10 1 質点デバイスの固有周波数と PZT による発電電圧の比較

まず、1 質点デバイスのモデルを作成し FEM による応力解析を行った。作成した 1 質点デバイスには本来 PZT が貼付してあるが、応力解析では簡単のため省略した。作成したデバイスは付加しているおもりに高さがあるため重心がずれてしまう。この影響から、重心を集中化したモデルで振動モード形状を算出するのは誤差が伴うため、シミュレーションソフトによる FEM にて算出し検討を行う。シミュレーション方法は、まずモデルを作成し固有周波数を算出する。算出した固有周波数で固定部分を鉛直方向に振動させてシミュレーションを行った。入力振幅は 0.5 G とした。図 2.11 にシミュレーションによって得られた 1 質点デバイスの応力分布図を示す。1 次モードでは、一様の方向に曲がっている振動モード形状となった。それに対し、2 次モードでは板バネの中ほどで曲げと引っ張り面が反転している振動モードとなっている。そのため応力は プラス要素とマイナス要素が混在するような分布となっている。これにより、PZT 素子は曲げ方向により出力の極性が決まるため、電圧出力が相殺され、2 次モードの出力開放電圧が低いことが考えられる。しかし、1 質点デバイスの 2 次モードは加速度特性のゲインも出力開放電圧と同様に低いため、応力分布が原因で出力が低いとは言い切れない。よって、2 質点デバイスでの実験検証により応力分布による出力電圧の相殺について考察を行う。

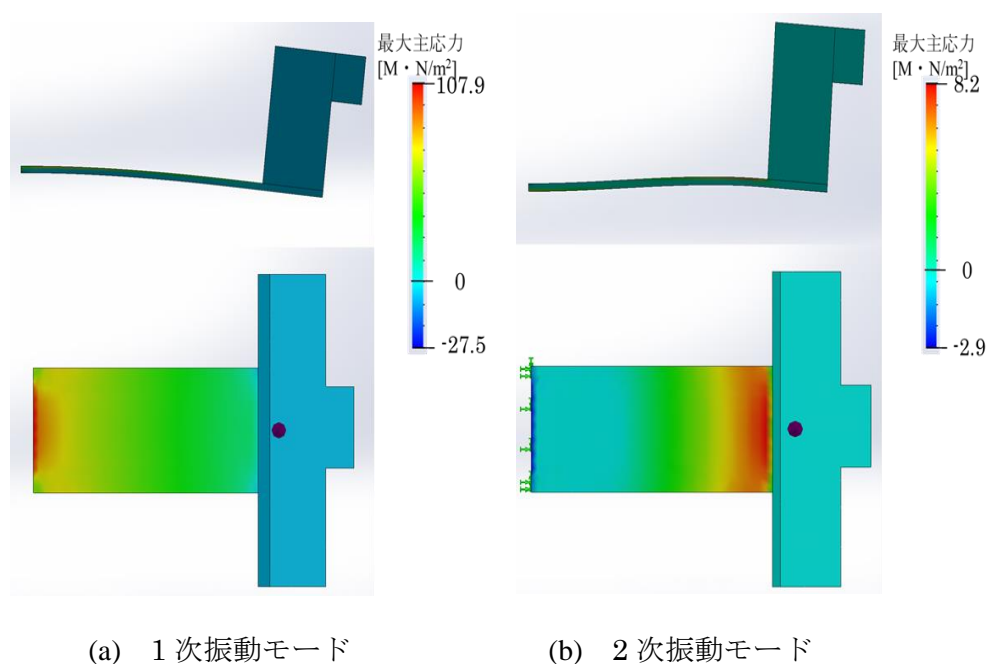
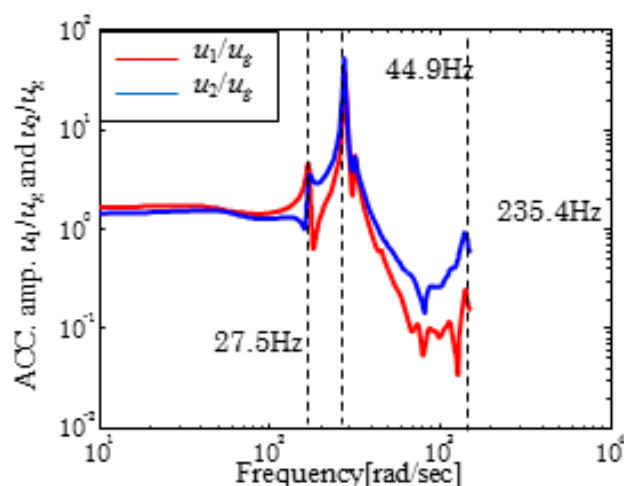
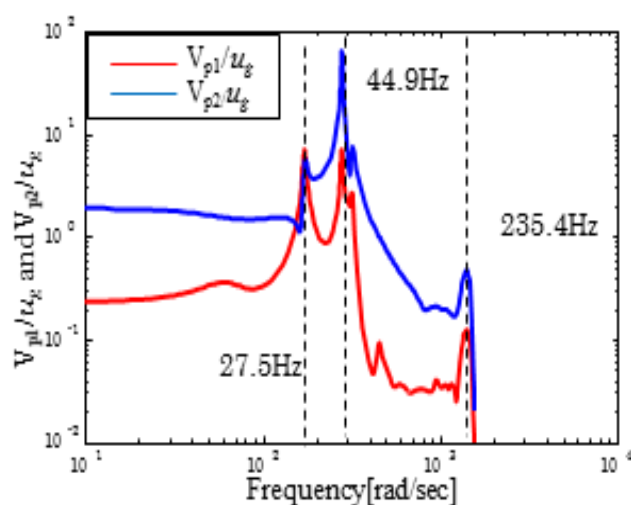


図 2.11 1 質点デバイスにおける振動モード形状と応力(最大主応力)分布図

2 質点デバイス(A)のシステム同定実験結果を図 2.12 に示した。これにより 2 質点デバイス(A)には、1 次モードが 27.5 Hz、2 次モードが 44.9 Hz、3 次モードが 235.4 Hz となる 3 つのモードが存在することを確認した。また、出力は加速度、開放電圧共に 2 次モードで最大となることがわかる。それに対し、1 次、3 次モードの出力は非常に小さいため、発電に有効なモードではないことが考えられる。次に、加速度特性を見ると 2 次モードでは 1 層と 2 層での出力はほぼ等しい値が出ていることがわかる。しかし、出力開放電圧では 1 層の出力ゲインは 17.1 dB、2 層の出力ゲインは 36.4 dB となっており、19.3 dB の差があることが確認できる。つまり、2 次モードでの 1 層の出力は自由端の加速度は大きいが出力開放電圧が小さいという結果となった。1 質点デバイスでは加速度に比例した出力開放電圧となっていたため、2 質点となったことで異なる結果となっていることがわかる。以下ではその原因について考察する。



(a) 加速度特性



(b) 出力開放電圧特性

図 2.12 2 質点デバイスの固有周波数と PZT による発電電圧の比較

2 次モードにおける 1 層出力開放電圧の低下は、2 質点構造における振動モード形状の違いによるものと考えられる。シミュレーションにより算出した 2 次モードでの振動モード形状と応力分布を図 2.13 に示した。振動モード形状は、2 層は一樣の方向に曲がっていることに対して 1 層は板ばねの中ほどで曲げ方向が変わっていることが確認できる。このことは応力分布にも顕著に表れている。2 層の応力は全てプラス要素であること対し、1 層の応力はプラス要素とマイナス要素が混在していることがわかる。つまり、1 層は板バネの中ほどで曲げと引っ張り面が反転しているということが確認できた。この応力分布の影響を考慮し、次節にて改善したデバイスを提案し、その検討を行う。

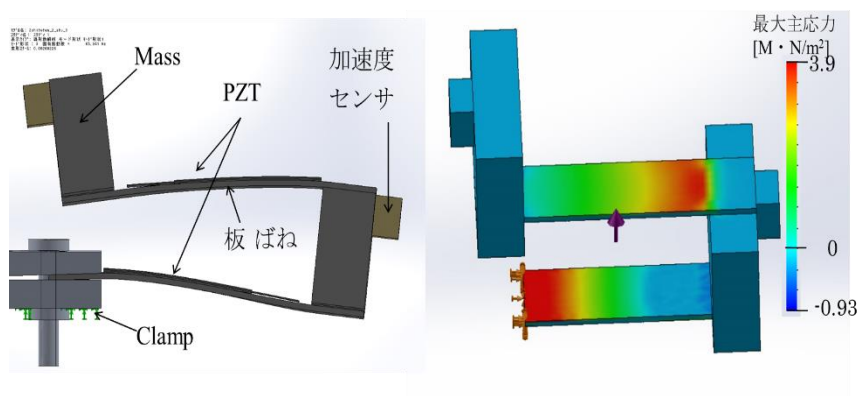


図 2.13 2 質点デバイス(A)の 2 次モードにおけるモード形状と応力(最大主応力)分布図

2.2.5 応力分布を改善した 2 質点デバイスの製作

曲げモード形状による応力分布により出力が低下していることを確認するため、応力分布の改善された構造体の提案、実験検証を行う。応力のマイナス要素が PZT 貼付位置に入らないよう、板バネを 12 mm 長くしたモデルを作成しシミュレーションを行った。板バネの延長は、PZT 貼付位置から応力のマイナス要素が十分離れることを期待している。2 次モード固有周波数での単一周波数加振時の応力分布を図 2.14 に示す。板バネを延長したことにより、応力のマイナス成分が PZT 貼付位置から十分離れていることがわかる。これにより、PZT にかかる応力のプラス要素とマイナス要素の混在がなくなり出力電圧の相殺が改善されることが考えられる。このモデルを実際に製作し、加速度特性と出力開放電圧特性を比較し応力分布による出力電圧についての検証を行った。

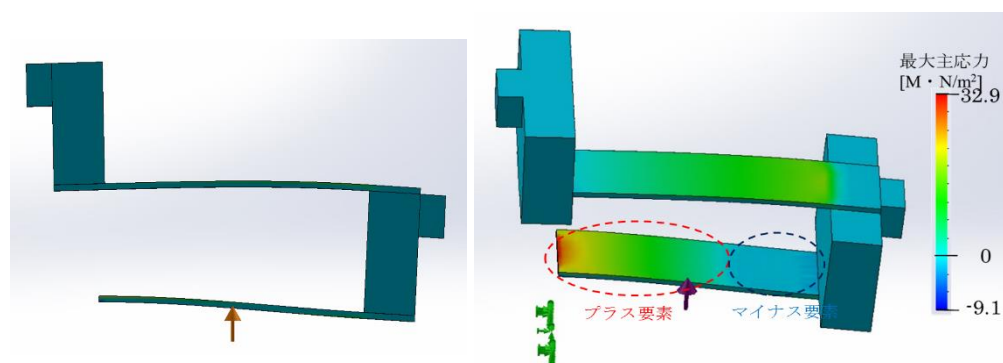


図 2.14 2 質点デバイス(B)の 2 次モードにおけるモード形状と応力(最大主応力)分布図

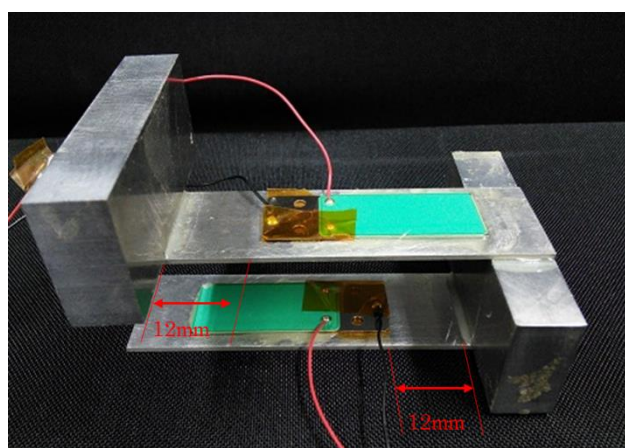


図 2.15 2 質点デバイス(B)

図 2.15 に製作した発電デバイスを示す。これを以下では 2 質点デバイス(B)と呼ぶこととする。前節の図 2.3 と比較すると板バネが伸び、PZT が貼付されていない面積が広がっている。このデバイスを使用し、前節の 2 質点デバイスと同じ試験構成にてシステム同定試験を行った。システム同定試験結果を図 2.16 に示す。これにより改善した 2 質点デバイス(B)には、1 次モードが 21.3 Hz、2 次モードが 39.6 Hz、3 次モードが 224.3 Hz となる 3 つのモードが存在することを確認した。また、出力は加速度、開放電圧共に 2 次モードで最大となっており 2 質点デバイス(A)と同一の特性である。まず、加速度特性を見ると 2 モードでは 1 層と 2 層での出力はほぼ等しい値が出ていることがわかる。それに加え、出力開放電圧では 1 層の出力ゲインは 28.0 dB、2 層の出力ゲインは 38.4 dB で 10.4dB の差となった。これにより、2 質点デバイス(A)から 9.9 dB の出力ゲインの差が小さくなっていることを確認した。このことより、応力分布を改善することによって 2 質点デバイス(A)の 2 次モードにおける特性が改善されたことがわかった。

以上の 1 質点デバイス、2 質点デバイス(A)、2 質点デバイス(B)での試験結果により、板バネの中ほどで曲げと引っ張り面が反転する振動モードでは出力電圧が相殺し出力が低下することがわかった。このことにより応力分布が出力電圧に大きく関わってくることがわかる。この実験では応力のプラス要素とマイナス要素が混在することで出力が低下することのみの検証であったが、応力の大小についても出力電圧に相関性があると考えられる。

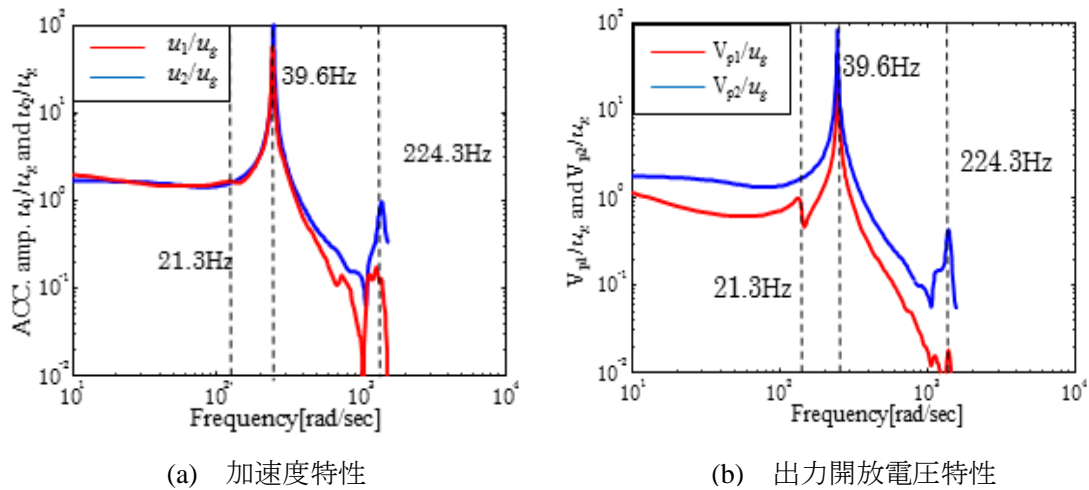


図 2.16 2 質点デバイス(B)の固有周波数と PZT による発電電圧の比較

第 3 章 圧電素子の製作と発電特性試験

3.1 片持ち梁式圧電素子に対する応力解析

電圧出力と相関性の高い要素を検討し、より効率的に発電の行える素子形状やデバイスの構成を考察することを目的とし、圧電デバイスを製作する。圧電デバイスの電圧出力と相関性が高いと考えられる応力を計算することにより出力電圧の予測、実験結果と比較検証できる。そのため圧電デバイスの製作に先立ち、3DCAD ソフトを使用し圧電素子形状に対する応力解析を行った。応力解析は FEM を使用し計算を行う。形状効果の違いを調べるために応力解析を行ったデバイスは、正方形・長方形・台形の 3 種類である。

四角形状と三角形状の最大応力について以下に示す。本稿では、圧電デバイスの片側を固定した片持ち梁として振動解析を行う。片持ち梁における曲げ応力 σ [N/m²] ⁽¹⁶⁾ を式(3.1)に示す。

$$\sigma = \frac{W}{Z} \quad [\text{N/m}^2] \quad (3.1)$$

$$M = Wx \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (3.2)$$

$$Z = \frac{I}{y} \quad [\text{m}^3] \quad (3.3)$$

ここで M は式(3.2)により導出される曲げモーメント、 Z は式(3.3)により導出される断面係数である。また、 W は先端への集中荷重、 y は図心軸からの距離、そして I は断面 2 次モーメントである。式(3.1)より導出される四角形状の片持ち梁における最大曲げ応力を図 3.1、三角形状の片持ち梁における最大曲げ応力を図 3.2 に示す。ここで、 x は荷重端からの距離、 l は梁の長さ、 b_0 は固定端における梁の幅、 b は x における梁の幅、そして h は梁の厚さである。この結果により、 x/b が一定である三角形状は最大応力がすべての x に渡って一定となる。それに対し、四角形状は固定端で最大となる。この形状の違いを製作する圧電素子に応用し設計を行う。

表 3.1 にそれぞれの圧電材料の形状を示す。いずれもバイモルフ型である。バイモルフ型とは、圧電材料 2 枚をシムプレートと呼ばれる金属弾性板の両面に張り付け並列接続したものである。金属弾性板には厚さ 0.1 mm のリン青銅板を使用する。圧電デバイスの厚さ、表面積は 450 mm² でほぼ等しくなるように設計している。また、台形に関しては厚さによる出力の変化を見るために厚さが異なるデバイスも制作する。形状の違いでは式(3.1)、からくる応力分布の違い、台形の厚さ違いでは共振周波数やそれに伴う減衰の早さの違いによる影響を検証する。

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z} = -\frac{6Wx}{b_0 h^2}$$

(Maximum at fixed point)

図 3.1 四角形状の片持ち梁における最大曲げ応力

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{Z} = -\frac{6Wx}{b h^2}$$

(Constant at everywhere)

図 3.2 三角形形状の片持ち梁における最大曲げ応力

表 3.1 圧電デバイス形状

	upper side [mm]	lower base [mm]	height [mm]	thickness [mm]
square	21.2	21.2	21.2	0.2
rectangle	10	10	45	0.2
trapezoid(A)	5	25	30	0.2
trapezoid(B)	5	25	30	0.3
trapezoid(C)	5	25	30	0.4

図 3.3 に作成したモデルを示す。製作の都合上尖頭形にはできず、三角形状ではなく台形状となっている。この形状では応力分布は一定にはならないがその影響についても FEM にて検証する。ここでは自由端に初期入力として一定の力 F を印加し、圧電デバイス表面にかかる応力分布を算出する。応力は Von Mises 応力として算出している。図 3.4 に 0.98 N を印加したときの応力分布図を示す。初期入力は実際の試験を想定し、それぞれの形状の圧電素子に印加可能な範囲で選択した。台形状は先端以外の応力分布が均一であることが確認できる。それに対し、長方形と正方形は固定端に集中していることがわかる。このことより、台形状であっても先端以外の応力分布は均一であることから四角形状との応力分布が及ぼす出力電圧への影響が比較できると考えられる。

台形は長方形や正方形と比べ広い面積に応力がかかるため効率よく発電できると考えられる。また、長方形は他の形状と比べ入力に対する最大応力が非常に大きく、応力総和が大きくなるという特徴があり電圧出力は大きいと推測できる。四角形状に関しては、最大応力となる固定端の長さが異なるため、それに対する発電効率の違いを比較することが目的である。

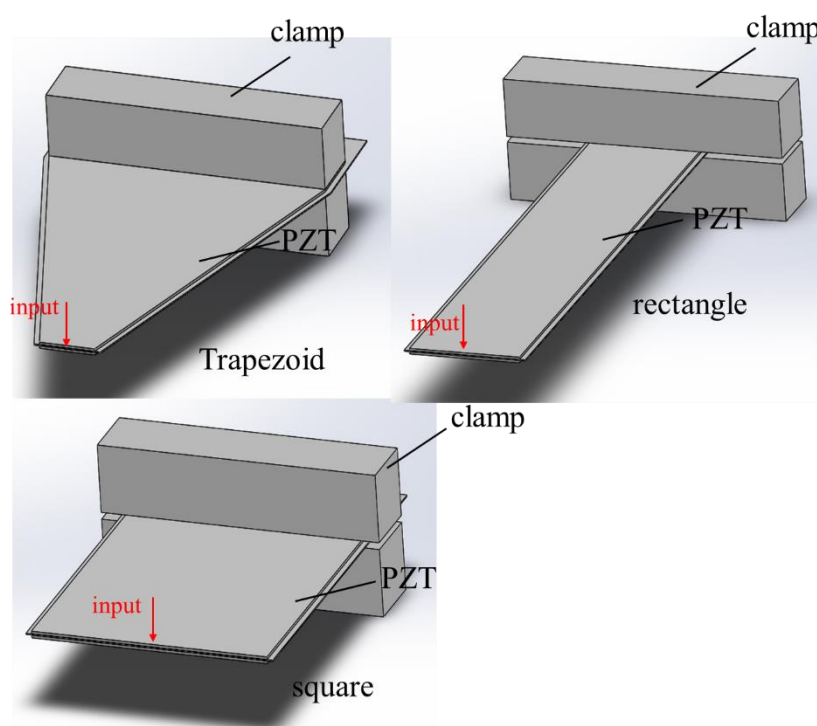


図 3.3 各形状のモデル図

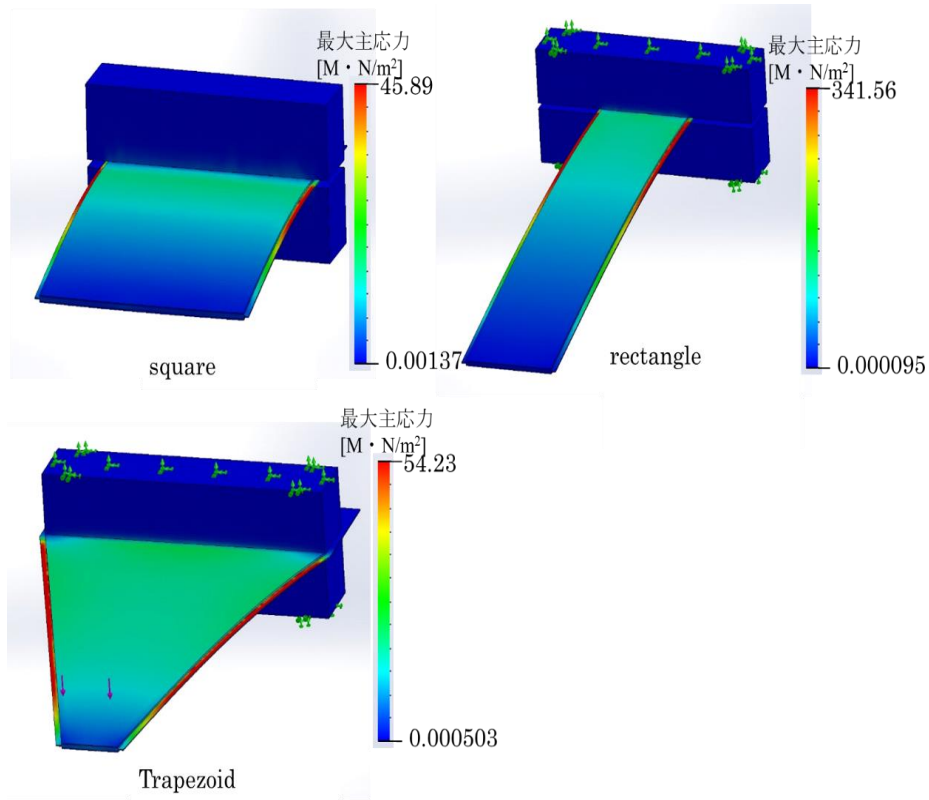


図 3.4 各形状の応力分布図

また、式(3.4)はバイモルフ型エレメントにおける片端固定、自由端荷重での出力電圧式⁽¹⁷⁾である。各定数は図 3.5 に示したように、長さ l 、幅 w 、厚さ t 、力 F である。 g_{31} は電圧出力係数と呼ばれ、圧電セラミックスにより決定される定数である。PZT は g_{31} が $-12 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m}/\text{N}$ となっている。設計した圧電素子で正方形形状と長方形形状で長さ l と幅 w の違いでこの論理式との相関性も検証する。また、台形状では形状項はそのまま厚さ t による電圧出力の変化を検証する。

$$V_p = \frac{3}{4} g_{31} \frac{1}{tw} F \quad [\text{V}] \quad (3.4)$$

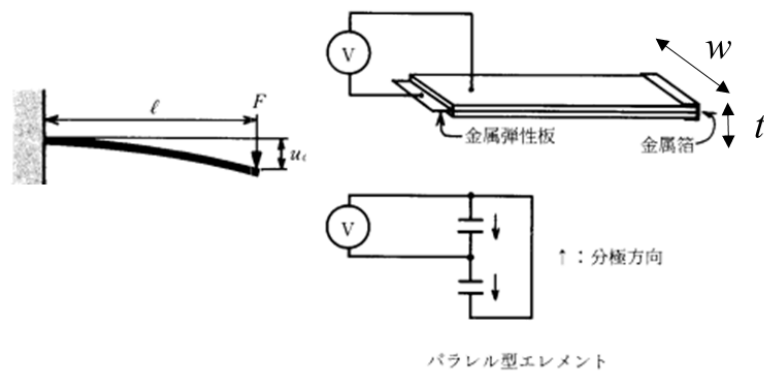


図 3.5 片持ち梁式バイモルフ型圧電素子

3.2 発電特性基礎試験

圧電素子の基礎試験に先立ち、製作した圧電素子を図 3.6 に示す。前節の正方形形状の圧電素子を PZT A、長方形形状の圧電素子を PZT B、台形形状の厚さ 0.2mm のものを PZT C、0.3mm のものを PZT D、0.4mm のものを PZT E とする。詳しい寸法は前節の表 3.1 と同様であり、いずれもリン青銅の金属弾性板を 2 枚の圧電材料ではさんで接着したバイモルフ型である。図 3.6 に写っている圧電素子を挟んでいる棒は、平行キーと呼ばれる金属棒である。試験ごとのクランプ条件の変化による測定のはらつきをなくし、試験結果の妥当性を向上させるために導入した。以上に示した PZT A～PZT E の発電特性を詳しく検証し、その結果と応力解析結果や式(3.4)との比較を行うことにより発電と相関性の高い要素を検証する。

発電特性基礎試験構成を表 3.2 に示す。圧電素子を図 3.7 の様にクランプし、片持ち梁の構造でのフラップ棒によるはじき試験を行う。フラップ棒はハイトゲージに固定されており、0.1mm 間隔で動かすことができる。このフラップ棒で圧電素子の先端に任意の変位を与えた後、フラップ棒を取り除くことによりステップ入力試験を行う。これにより、各圧電素子は固有振動数で機械振動し圧電効果により電圧出力が発生する。電圧出力と同時に変位波形を測定することにより機械特性と電気特性の解析を行う。圧電素子の先端変位はレーザ変位計にて測定を行う。この試験は、各素子の共振周波数やマッチング抵抗⁽¹⁸⁾を測定すること目的としている。圧電素子の電圧出力と先端変位の測定は WAVE LOGGER(KEYENCE 製)を使用し、先端変位の検出はレーザ変位計(KEYENCE 製 IL-100)にて測定を行った。

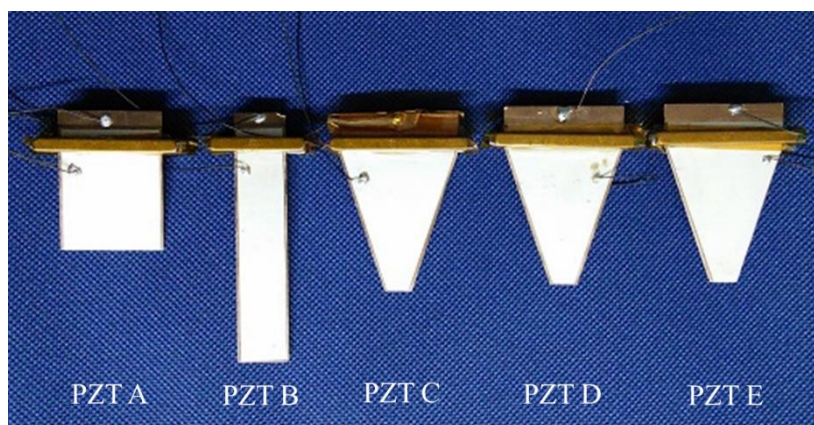


図 3.6 製作した圧電デバイス

表 3.2 はじき試験条件

試験条件	
試験方法	はじき試験
初期入力	先端変位[mm]
使用素子	PZT A, B, C, D, E
試験時間	5 s
サンプリング時間	100 μ s
計測パラメータ	出力電圧[V]
	先端変位[mm]
使用機材	マルチ入力データロガー(NR-600)
	高速アナログ計測ユニット(NR-HA08)
	高速高電圧計測ユニット(NR-HV04)
	レーザ変位計(IL-100)

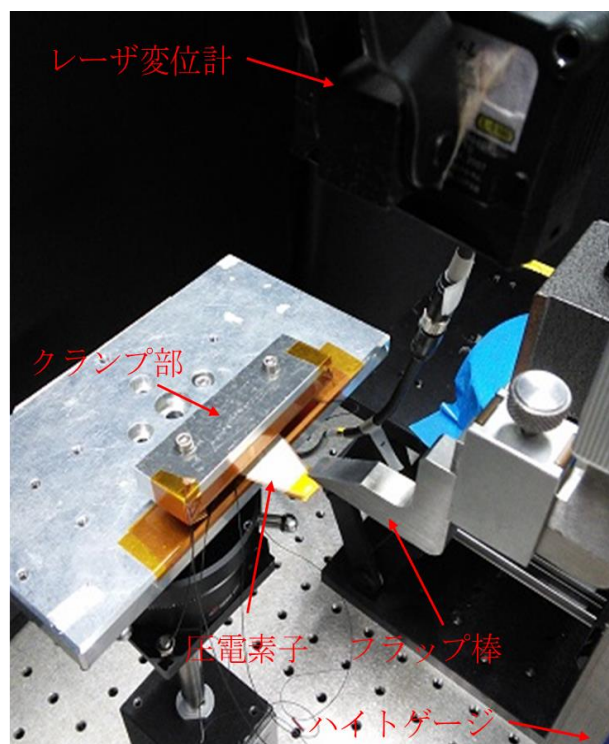


図 3.7 はじき試験装置

発電特性基礎試験結果を表 3.3 に示す。マッチング抵抗 $Z[\Omega]$ は最大電力が得られるよう、以下の式にて算出した。

$$Z = \frac{1}{2\pi fC} \quad [\Omega] \quad (3.5)$$

ここで、 $f[\text{Hz}]$ は固有周波数、 $C[\text{F}]$ は圧電素子の内部容量値である。以降の実験では、ここで求めたマッチング抵抗 Z を各素子に負荷し、実施する。

表 3.3 発電基礎特性

	正方形	長方形	台形0.2	台形0.3	台形0.4
	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D	PZTE
固有周波数[Hz]	585	113	437	632	770
容量値[nF]	100.1	167.2	114.8	76.9	86.3
マッチング抵抗[k Ω]	3.0	7.4	3.0	3.1	2.47

3.3 エネルギー回生効率試験

エネルギー回生効率試験構成について表 3.4 に示す。圧電素子を図 3.8 のようにクランプし、片持ち梁の構造で試験を行った。圧電素子の先端におもりを糸で吊るし初期変位を与える。おもりに分銅を用いた。初期変位とおもりの重量により圧電素子への入力エネルギーを算出する。その後、糸を切断することで各圧電素子は固有周波数で機械振動し圧電効果により電圧出力が発生する。このとき、電圧出力と同時に変位波形を測定することにより機械特性と電気特性の解析を行った。

式(3.6)～(3.9)が試験で評価した解析値である。式(3.6)の最大電力 P_{max} は負荷抵抗 R と最大電圧 V_{max} を使い算出した。式(3.7)に示した圧電素子への入力エネルギー W_i は圧電素子をばね近似し、フックの法則を用いることにより導出することができる。ここで、 x_0 はおもりを吊り下げたことにより発生する初期変位、 m はおもりの重量、 g は重力加速度である。式(3.8)で示した出力エネルギー W_o は電力波形を時間積分したものである。電力波形は電圧波形 V_t を用い、 V_t^2/R で算出した。時間積分の範囲は機械振動の減衰により V_t が 0 となる十分な時間が経過するまでとした。そして、式(3.9)の回生効率 η は式(3.7)、(3.8)の入力エネルギーと出力エネルギーの比により導出する。

$$P_{max} = \frac{V_{max}^2}{R} \quad [\text{W}] \quad (3.6)$$

$$W_i = \int F dx \approx \frac{1}{2} Fx_0 = \frac{1}{2} mgx_0 \quad [\text{J}] \quad (3.7)$$

$$W_o = \frac{1}{R} \int V_t^2 dt \quad [\text{J}] \quad (3.8)$$

$$\eta = \frac{W_o}{W_i} \times 100 \quad [\%] \quad (3.9)$$

表 3.4 エネルギー回生効率試験条件

試験条件	
試験方法	おもり吊り下げ試験
入力荷重	10～900 g
使用素子	PZT A, B, C, D, E
負荷抵抗	マッチング抵抗
試験時間	5 s
サンプリング時間	100 μ s
計測パラメータ	出力電圧[V]
	先端変位[mm]
使用機材	マルチ入力データロガー(NR-600)
	高速アナログ計測ユニット(NR-HA08)
	高速高電圧計測ユニット(NR-HV04)
	レーザ変位計(IL-100)

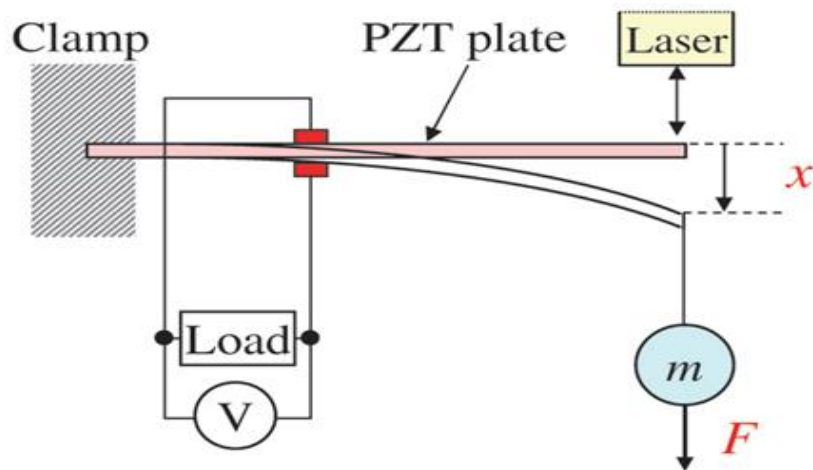


図 3.8 試験構成

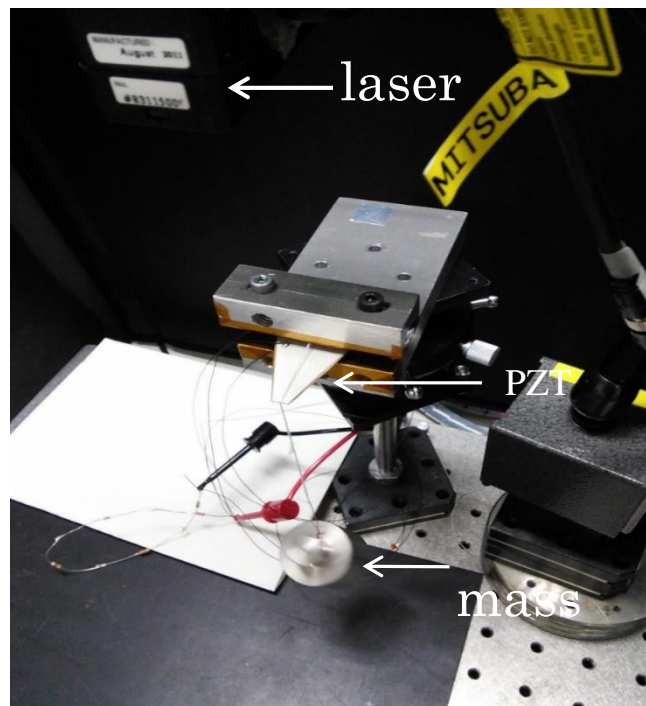


図 3.9 試験装置

3.4 エネルギー回生効率試験結果

本試験では PZT A から PZT E の圧電素子に対し、前節説明した試験によって得た各出力値の比較を行った。圧電素子に負荷するおもりの重量は、それぞれの圧電素子の厚さや形状を考慮した範囲で選択をしている。

まず表 3.5 に負荷したおもりの重量が 100 g 時の試験結果を示す。負荷荷重が等しい場合、固有周波数が低くばね定数が低いと考えられる PZT B は入力エネルギーが非常に大きくなった。その結果、最大電圧が他の形状よりも大きくなったと考えられる。最大電圧で比較すると、PZT A の 4.1 倍、PZT C の 4.3 倍という非常に高い値となっている。この結果より、同一荷重であれば PZT B が有利であることがわかる。しかし、前節で示した通り PZT B は固定端に応力が集中しており非常に壊れやすい構造であるため、実用化する際は入力振幅の制限をすることが必要である。また、微小振動から回生したい場合などに有用であると考えられる。

表 3.5 100 g 負荷時の発電特性

	正方形	長方形	台形0.2	台形0.3	台形0.4
	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D	PZT E
最大変位 [mm]	0.173	4.90	0.561	0.141	0.112
最大電圧[V]	7.11	29.3	6.81	4.26	4.55
電力 [mW]	16.9	116.2	51.2	17.5	8.4
入力エネルギー[10^{-5} J]	8.51	240	27.5	6.90	5.49
出力エネルギー[10^{-5} J]	2.30	52.9	8.22	2.36	1.15

次に、PZT A と PZT B に印加荷重に対する最大電圧を図 3.10 に示した。前述のように、PZT A は負荷重量に対する入力エネルギーが大きい傾きの大きなグラフとなっていることがわかる。このグラフの PZT A の近似線式を式(3.10)、PZT B の近似線式を式(3.11)に示した。また、式(3.12)、式(3.13)は電圧出力理論式(3.4)に長さ l 、幅 w をそれぞれ代入したものである。ちなみに、厚さ t はどちらも 0.2 mm となっている。

$$y_{\text{PZT A}} = 0.0869 x \quad (3.10)$$

$$y_{\text{PZT B}} = 0.2889 x \quad (3.11)$$

$$V_{\text{PZT A}} = \frac{3}{4} g_{31} \frac{1}{t} F \quad (3.12)$$

$$V_{\text{PZT B}} = 4.5 \cdot \frac{3}{4} g_{31} \frac{1}{t} F \quad (3.13)$$

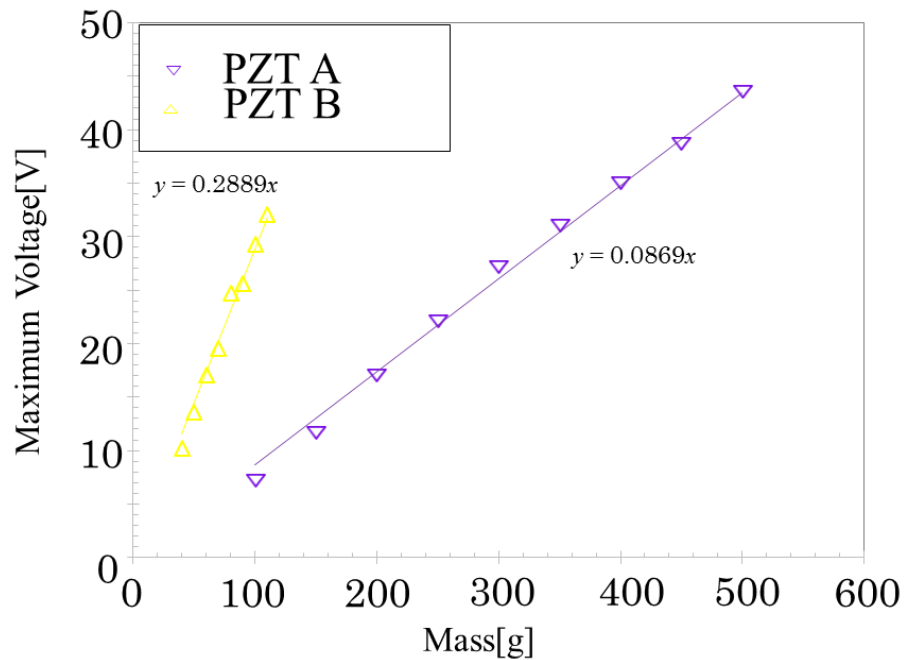


図 3.10 四角形状圧電素子の印加荷重に対する最大電圧

この近似線式と電圧出力理論式とを比較する。まず、PZTB の近似線式である式(3.11)は、PZTA の式(3.10)の 3.32 倍という結果となった。それに対し電圧出力理論式である式(3.13)、式(3.12)では 4.5 倍となっている。これは長方形形状圧電素子である PZTB は非常に柔らかいため実験での誤差が大きいためこのような差が生じたと考えられる。また、低い荷重でも固定端に大きな応力がかかるため、応力飽和による出力低下⁽¹⁸⁾も考えられる。

PZTC、PZTD、そして PZTE の入力荷重に対する最大電圧を図 3.11 に示した。先ほどと同様に、PZTC の近似線式を式(3.14)、PZTD の近似線式を式(3.15)、PZTE の近似線式を式(3.16)に示した。また、式(3.17)、式(3.18)、式(3.19)は電圧出力理論式(3.4)に厚さ t をそれぞれ代入したものである。電圧出力理論式(3.4)は四角形状の圧電素子に対する式であるが、この比較では形状が等しく厚さ t のみを変化させている。そのため、長さ l 、幅 w を考えず、台形形状である PZTC、PZTD、PZTE での厚さ t による変化での比較を行う。

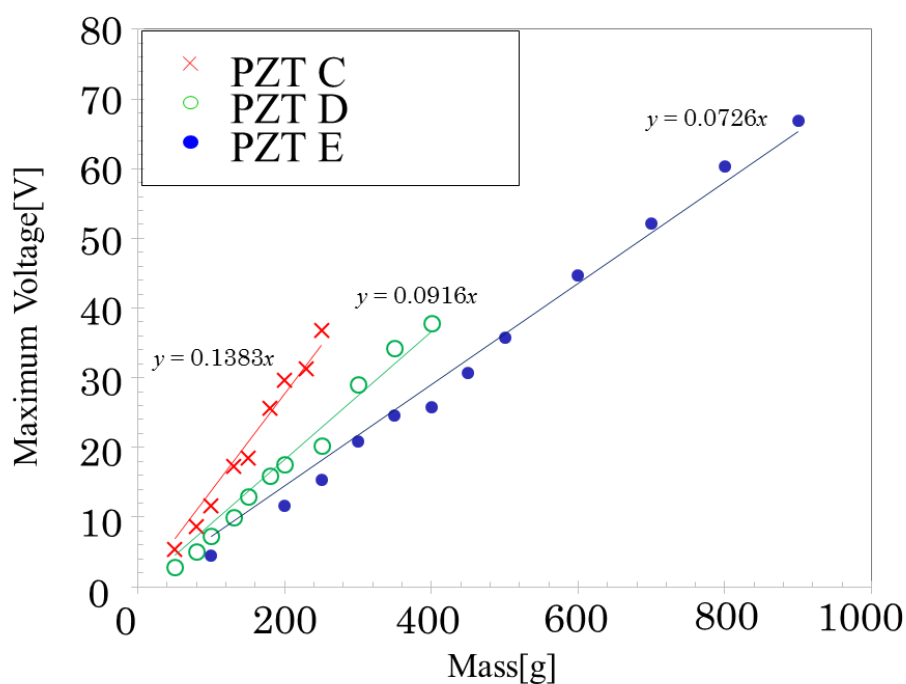


図 3.11 台形形状圧電素子の印加荷重に対する最大電圧

$$y_{\text{PZT C}} = 0.1383 x \quad (3.14)$$

$$y_{\text{PZT D}} = 0.0916 x \quad (3.15)$$

$$y_{\text{PZT E}} = 0.0726 x \quad (3.16)$$

$$V_{\text{PZT C}} = 2 \cdot \frac{3}{4} g_{31} \frac{l}{w} F \quad (3.17)$$

$$V_{\text{PZT D}} = \frac{7}{10} \cdot \frac{3}{4} g_{31} \frac{l}{w} F \quad (3.18)$$

$$V_{\text{PZT D}} = \frac{10}{9} \cdot \frac{3}{4} g_{31} \frac{l}{w} F \quad (3.19)$$

PZT C の近似線式である式(3.14)は、PZT D の式(3.15)の 1.51 倍、PZT D は PZT E の式(3.16)の 1.26 倍となった。それに対し電圧出力理論式では、PZT C の式(3.17)は PZT D の式(3.18)の 1.40 倍、PZT D は PZT E の式(3.19)の 1.28 倍となっている。このことにより、形状が四角形状でなくても厚さのみの比較であれば形状項を無視して比較できるということがわかる。ここで改めて電圧出力式(3.4)を見ると、電圧出力は圧電材料の厚さ t に反比例していることがわかる。しかし、圧電材料の量は厚さ t が増えればその分増えているため出力の増加が考えられるが試験結果は理論式通りの結果となった。このことより、圧電材料の量よりも圧電素子の機械的性質が発電に大きく寄与していることが確認できた。

図 3.12 に各素子の付加重量による入力エネルギーを示す。素子形状で入力エネルギーを比較すると、PZT B の傾きが非常に大きく、急激に増加する結果となった。また、台形形状では厚さが大きくなればばね定数も上昇するため、厚さに反比例して傾きが小さくなっていることが確認できる。図 3.13 に示した出力エネルギーも同様の傾向が見られた。

また、表 3.6 に各素子の平均回生効率を示す。平均回生効率とは、式(3.9)により算出した各入力のリサイクル効率を平均したものである。PZT C が 27.4%で最高効率となった。形状で比較すると、四角形状では正方形形状である PZT A が 25.7%、長方形形状である PZT B が 22.8% となっている。これは 2 つの素子の有効面積が等しいことに対して、応力集中する固定端の長さは PZT A と PZT B とでは約 2 倍の差がある。つまり発電に有効な面積に対して、最大応力が 2 倍の面積にかかることとなるため PZT A の方が効率の高い結果となったと考えられる。台形形状では、厚さ t が小さい PZT C から順に PZT D が 26.6%、PZT E が 25.4% となった。同形状の圧電素子での最大電圧は、厚さ t に反比例するという特性は前節で確認したとおりである。

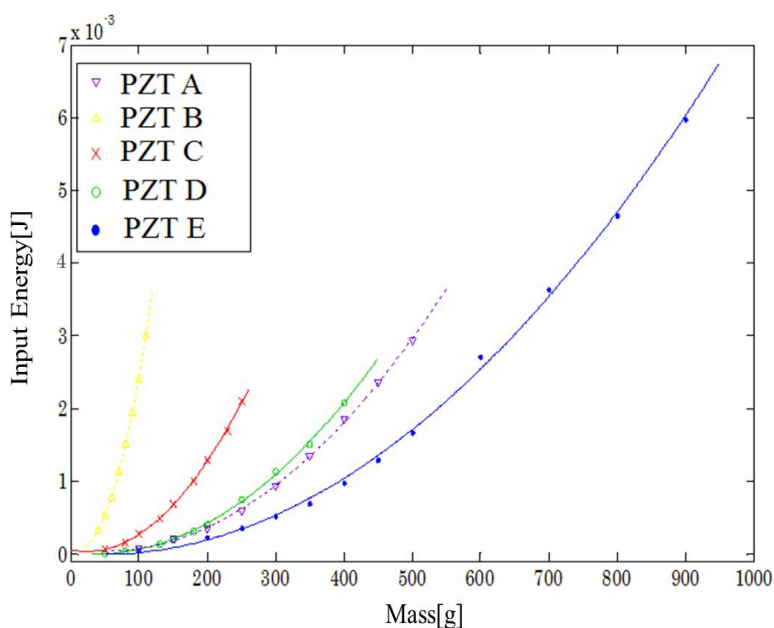


図 3.12 入力荷重に対する入力エネルギー

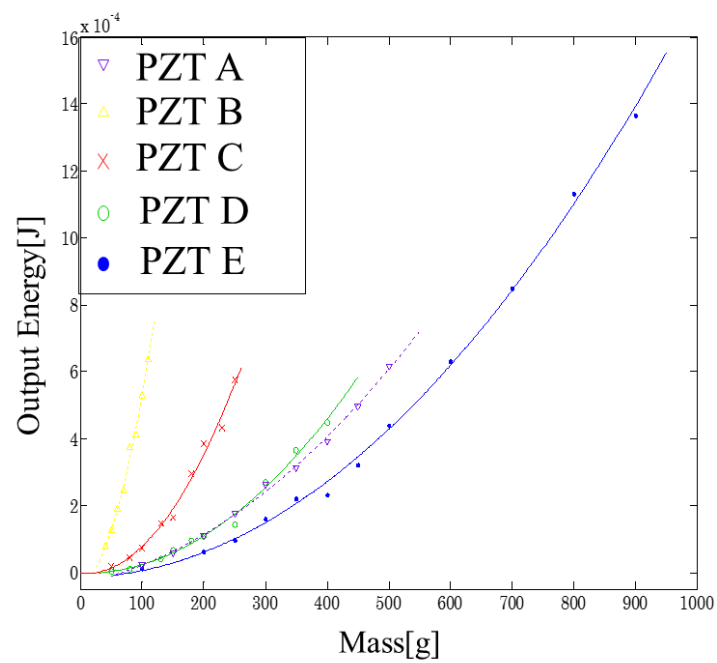


図 3.13 入力荷重に対する出力エネルギー

表 3.6 平均回生効率

	PZT A	PZT B	PZT C	PZT D	PZT E
平均回生効率[%]	25.7	22.8	27.4	26.6	25.4

また、PZT C、D、E のおもり 100 g 時の電圧出力の時間応答を図 3.14 に示す。この波形から簡易的ではあるが減衰比を算出し、表 3.7 に示す。当然ではあるが、厚さ t が大きくなるにつれて減衰が大きくなっていることがわかる。減衰が早ければ電力波形の積分値である出力エネルギーは小さくなる。これらのことから、厚さ t が大きい素子ほど効率が低い結果となったと考えられる。

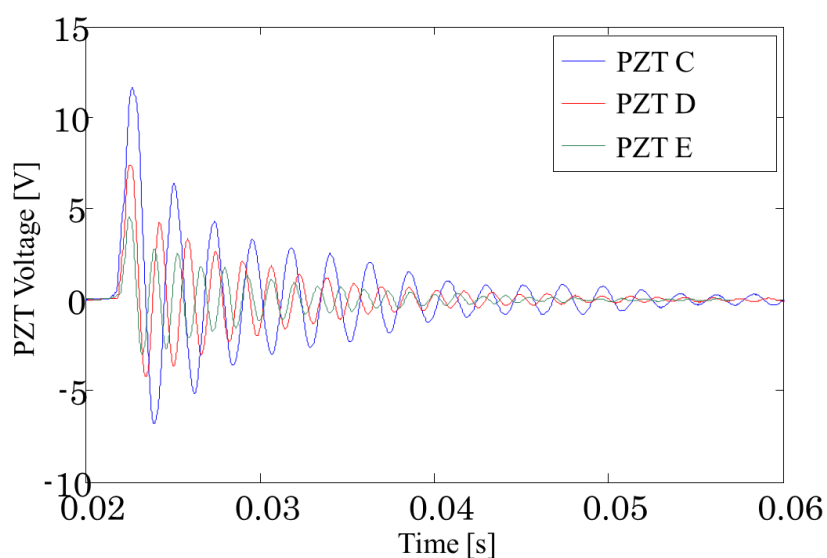


図 3.14 電圧出力時間応答波形

表 3.7 台形状圧電素子に対する減衰比

	PZT C	PZT D	PZT E
減衰比	0.547	0.576	0.616

第4章 繰り返し荷重による耐久試験

4.1 繰り返し荷重による耐久試験手順

前章では、作成した圧電素子に対する特性試験を行った。その結果、応力が圧電素材の表面に均一に分布する台形形状の圧電素子が高い効率で発電できることがわかった。本節では、自動車振動にて実際に使用することを想定し、台形形状の圧電素子である **PZT C** に対して耐久試験⁽¹⁹⁾を行う。これにより圧電素子が破壊せず使用できる先端荷重を調査することが目的である。耐久試験の方法を以下に示す。

1. 静荷重試験による校正式の導出

おもり吊り下げ試験により、先端荷重 F [N]により発生する歪 ϵ [μ ST]の曲線を描き、近似式を導出する。

2. 繰り返し荷重試験

入力を歪として強制加振による繰り返し荷重試験を行い、静荷重試験で導出した近似式により先端荷重を算出する。それにより得られた先端荷重 F – 繰り返し回数 n に対する疲労限度を実験的に導出する。

これにより、圧電素子の s – n 線図⁽²¹⁾を作成する。一般的に s – n とは応力–回数のことであるが、本研究では校正式を利用し先端荷重 F と繰り返し回数 n で作成を行う。これを以下では F – n 線図と呼ぶ。これにより自動車振動下での素子の先端に付加したおもりと加速度を計測することで先端荷重を算出し、 F – n 線図と比較することができる。繰り返し荷重試験を行うにあたり、圧電素子が破壊したタイミングをモニタリングにより計測する必要がある。このモニタリング方法についても本章で検証を行う。

4.2 静荷重試験による校正式の導出

繰り返し荷重試験に先立ち、静荷重試験による近似式の導出を行う。繰り返し荷重試験において、入力歪は歪ゲージにより検出した歪[μST]によって決定するが、これは素子の形状や歪ゲージの位置によって変化する。それを防ぐため、先端に付加したおもりと加速度によって算出できる先端荷重[N]に校正を行う。これにより、先端加速度を計測するだけで $F-n$ 線図と比較を行うことができる。試験方法は 3.3 節に示したおもり吊り下げ試験構成を使用した。試験に使用した素子を図 4.1 に示す。歪ゲージはクランプ部に可能な限り近づけて貼付した。

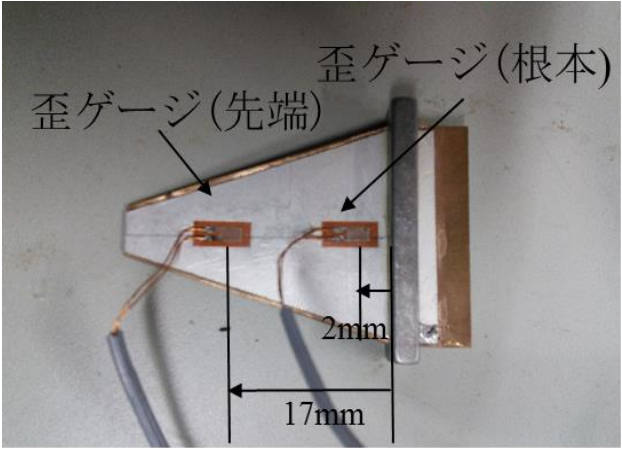


図 4.1 歪ゲージを貼付した圧電素子(PZT C)

表 4.1 校正式導出試験条件

試験条件	
試験方法	おもり吊り下げ試験
入力荷重	40～200 g
試験時間	5 s
計測パラメータ	歪[μST]
サンプリング時間	1 ms
歪ゲージ	東京測器FLA-2-23
使用機材	マルチ入力データロガー(NR-600)
	ひずみ計測ユニット(NR-ST04)

図 4.2 に試験結果を示す。導出した近似式は、 x を先端荷重、 y を歪とすると固定端歪が式(4.1)、先端歪が式(4.2)となる。

$$y = 93.6x^2 + 426.5x \quad (4.1)$$

$$y = 69.3x^2 + 292.2x \quad (4.2)$$

根本と先端で近似式に差が出ているのは、作成した圧電素子が完全な三角形状でなく台形形状であるためであると考えられる。これは応力分布図の図 3.4 にも表れている。繰り返し荷重試験では固定端の校正式である式(4.1)を利用し、校正を行った。

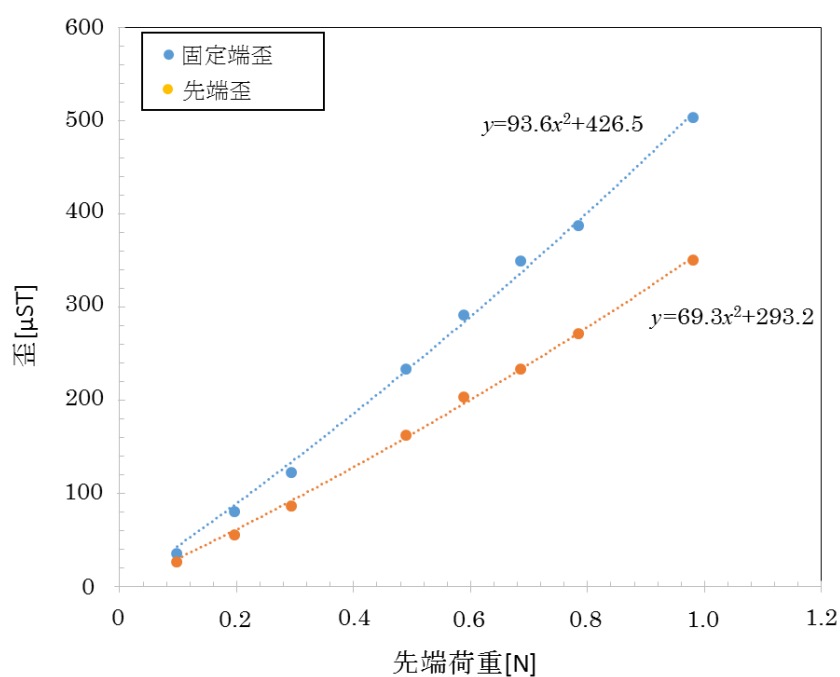


図 4.2 先端荷重に対する歪(PZT C)

4.3 結線位置による出力電圧計測

前節で示した通り、繰り返し荷重試験での破壊判定を出力電圧のモニタリングにより行う。そのため圧電素材の破壊時に出力電圧の変化を確実に検出できる結線位置を検討する必要がある。そのため、繰り返し荷重試験に先立ち、圧電素子と銅線の結線位置による出力への影響を検証する。

4.3.1 健全なデバイスにおける結線位置による出力電圧計測試験

結線位置による出力電圧計測試験には台形形状の圧電素子である PZT D を使用する。試験方法は 3.2 節に示したフラップ棒によるはじき試験と同様の試験を行う。使用した圧電素子を図 4.3 に示す。試験を行う結線位置を、結線 A、結線 B、結線 C、結線 D と呼ぶこととする。結線 A はクランプよりも外側の発電に寄与しない部分に結線を行った。結線 B は発電に寄与する有効面積のうち、最もクランプに近い位置に結線し、そこから先端に向かって 10 mm 間隔で結線 C、結線 D となっている。本試験では先端入力変位を 2 mm、負荷抵抗 3 k Ω に固定し、各結線位置での最大電圧、最大電力、出力エネルギーの比較を行った。

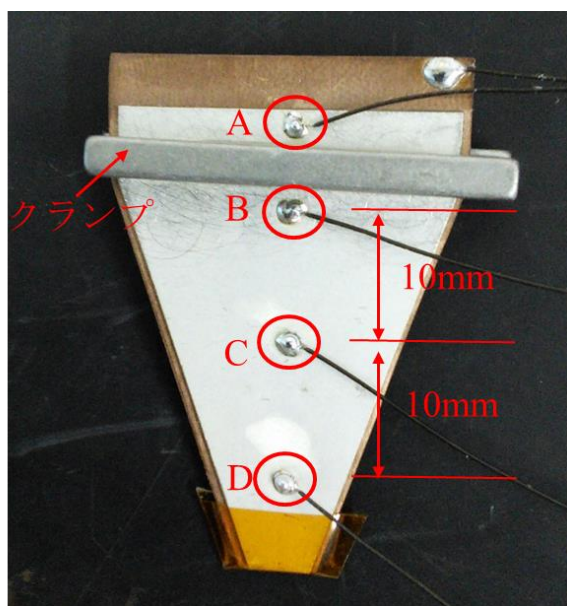


図 4.3 使用素子(PZT D)

試験結果を表 4.2 に示す。最大電圧、出力エネルギー共に結線位置による大きな変化は生じない結果となった。また、各結線位置の出力電圧波形を図 4.4 に示す。これからも出力波形の変化がないことが確認できる。これにより、圧電素子への結線位置は自由に選択できるということが確認できた。

表 4.2 結線位置による出力比較

	A	B	C	D
最大電圧[V]	34.343	30.927	32.410	32.567
最大電力[W]	0.394	0.320	0.354	0.354
出力エネルギー[mJ]	0.381	0.311	0.347	0.342

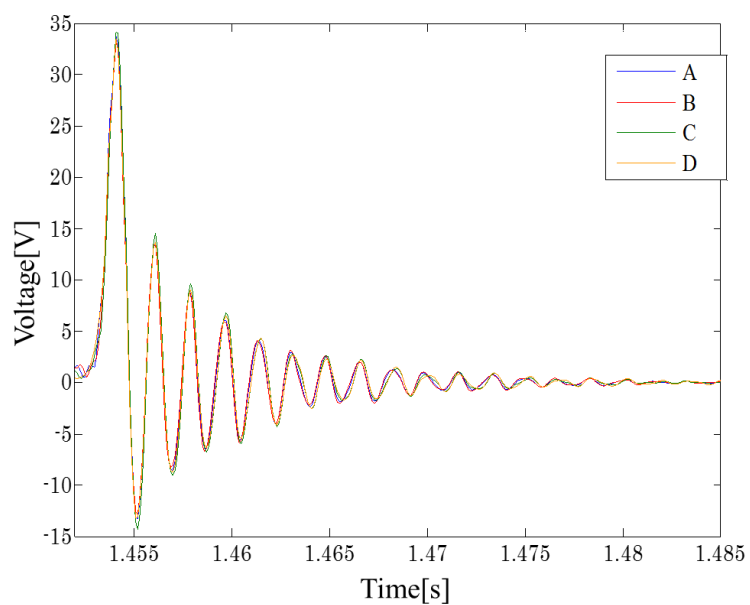


図 4.4 各結線位置による出力電圧波形

4.3.2 破壊したデバイスにおける結線位置の検証

次に固定端で破壊している PZT C を使用し同様の検証を行う。図 4.5 に固定端で圧電素材にクラックの入った PZT C を示す。また図 4.6、図 4.7 にクラックを拡大して写したもの (Keyence, VHX-5000 にて撮影)を示す。クラックは固定端に沿って入っている。この固定端でのクラックを境に結線 E、結線 F を施し出力電圧、出力エネルギー、出力電圧波形の比較をすることで繰り返し荷重試験での結線位置を決定する。

各結線位置での試験結果を表 4.3 に示す。結線 E、結線 F の最大電圧はほぼ等しいという結果となった。それに対し、出力エネルギーは結線 F の出力は結線 E の倍以上の値となった。これは出力電圧波形の違いによるものであると考えられる。図 4.8 に各結線位置による出力電圧波形を示す。結線 E での出力波形は、結線 F の波形と比較すると高周波のノイズが入ったような波形となった。これは固定端のクラックが、減衰振動中に離れたり密着したりすることにより発生していると考えられる。これにより出力電力の積分値である出力エネルギーに差が出ていることが確認できた。

この結果により、破壊判定のための出力電圧のモニタリングはクラックによる変化が検出できるクランプの外側の発電に寄与しない部分に結線することで行うことが最良であることを確認した。

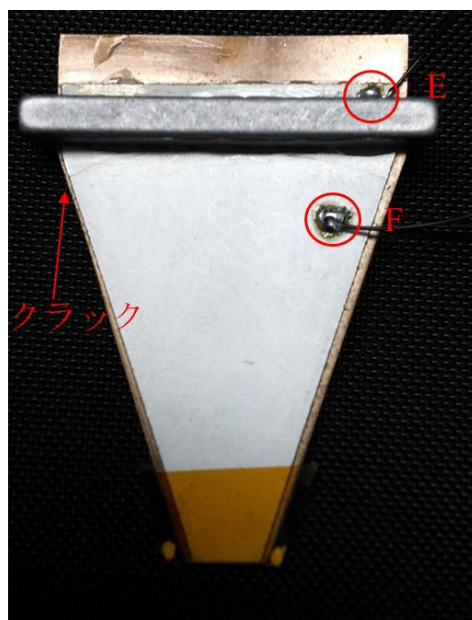


図 4.5 固定端で破壊した PZT C



図 4.6 固定端でのクラック(上から撮影)



図 4.7 固定端でのクラック(横から撮影)

表 4.3 結線位置による出力比較

	E	F
最大電圧[V]	19.473	19.059
最大電力[W]	0.127	0.121
出力エネルギー[mJ]	0.169	0.330

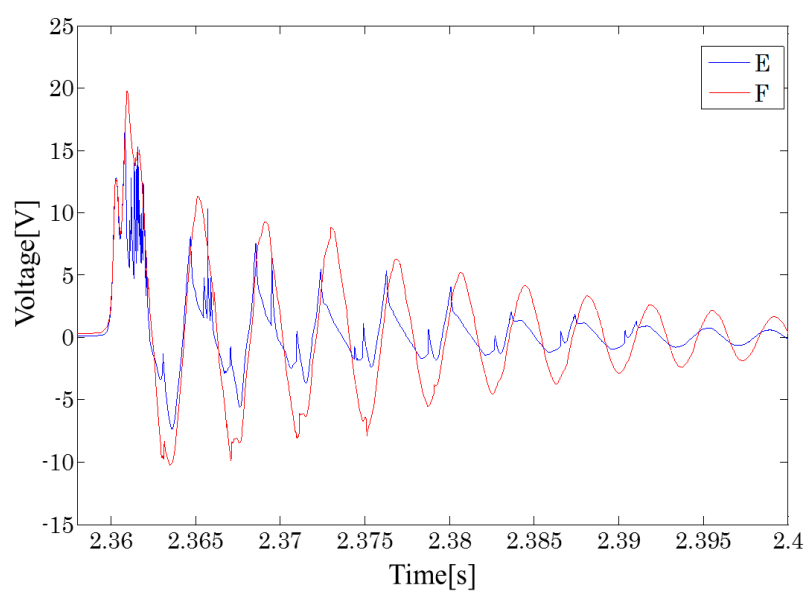


図 4.8 クラックを境にした各結線位置による出力電圧波形

4.4 繰り返し荷重試験

4.4.1 繰り返し荷重試験構成

作製した台形状圧電素子を実際に自動車に搭載することを想定し、繰り返し荷重試験を行った。圧電素子の先端におもりを固定し、共振周波数で強制加振することにより繰り返し荷重を印加する。これにより正と負の応力を交互に荷重する両振り試験と呼ばれる手法で $F-n$ 線図を導出する。おもりを付加した圧電素子を図 4.9 に示す。前節で導出した校正式は根本歪を使用しキャリブレーションを行う。また結線位置については、前節で示したようにクランプの外側である圧電素材の発電に寄与しない位置に結線し出力電圧のモニタリングを行う。これにより圧電素子の発電に対する有効面積のどの位置が破壊しても出力電圧の変化が発生すると考えられる。この出力電圧の変化により破壊のタイミングを判定する。

試験条件は以下の表 4.4 の通りである。加振器に圧電素子を固定し、加振により発生する歪を歪ゲージにより計測する。この歪により入力を決定する。試験回数については、鉄鋼系材料の疲労限度である 10^7 回とした。

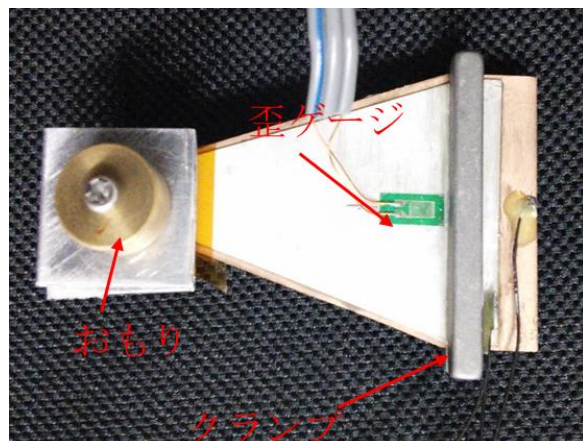


図 4.9 おもりを固定した圧電素子(PZT C)

表 4.4 繰り返し荷重試験条件

試験条件	
試験方法	繰り返し荷重試験(両振り)
入力	歪[μ ST]
加振回数	10^7 回
先端おもり	7 g
加振周波数	共振周波数
計測パラメータ	先端変位[mm] 出力開放電圧[V] 歪[μ ST]
歪ゲージ	東京測器FLA-2-23
サンプリング時間	500 ms
使用機材	マルチ入力データロガー(NR-600) 高速アナログ計測ユニット(NR-HA08) 高速高電圧計測ユニット(NR-HV04) ひずみ計測ユニット(NR-ST04) レーザ変位計(IL-100)

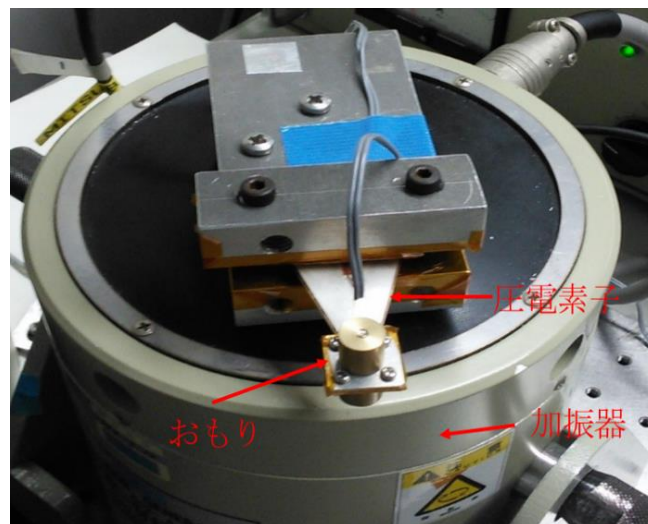


図 4.10 繰り返し荷重試験構成写真

4.4.2 繰り返し荷重試験結果

前節に示した試験構成にて、PZT C に対し繰り返し荷重試験を行った。試験結果を表 4.5 に示す。歪 ε [μST] から先端荷重 F [N] への変換は導出した校正式(4.1)を使用し行った。校正式(4.1)を使用し導出した F は、

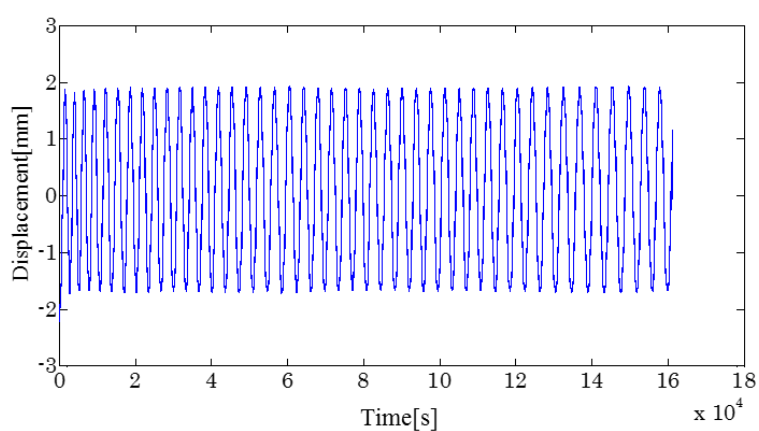
$$F = \frac{-427 + \sqrt{427^2 + 376 \cdot \varepsilon}}{188} \quad (4.3)$$

である。加振回数は圧電素子が破壊した時の回数を表示している。実験中に圧電素子が破壊しなかった場合は、加振回数を 10^7 回とした。

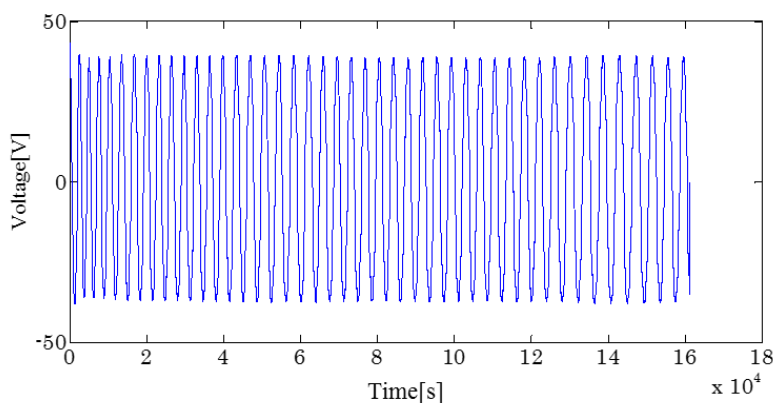
表 4.5 繰り返し荷重試験結果

根本歪[μST]	先端荷重(計算値)[N]	加振回数[回]
225.6	0.478	10^7
299.5	0.617	10^7
345.4	0.701	10^7
392.4	0.784	10^7
567.4	1.075	10^7
629.8	1.172	10^7
1037.3	1.753	10^7
1191.2	1.951	10^7
1261.5	2.039	10^7
1541.0	2.371	10^7
1653.9	2.499	10^7
2166.2	3.039	10^7
2460.3	3.326	2117000

図 4.11 に入力値が先端荷重換算で 3.04 N 時の先端変位と出力電圧の時間応答を示す。横軸は時間で、 10^7 回加振するまでの波形である。本試験では加振周波数が 60 Hz 前後でサンプリング周波数が 2 Hz であるためエイリアシングしている波形となっていることに注意されたい。しかし圧電素子が破壊した場合は、出力電圧波形に断続的な影響があるためその振幅の最大値の変化を確認することで破壊を検出できると考えられる。図 4.11 では先端変位、出力電圧共に急激な変化はないことがわかる。この波形と試験後の圧電素子の目視確認により、破壊しなかったと判断した。他の入力についても同様に判断を行った。



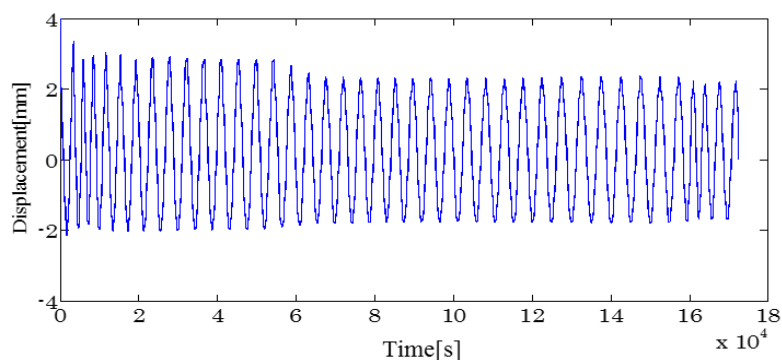
(a) 先端変位波形



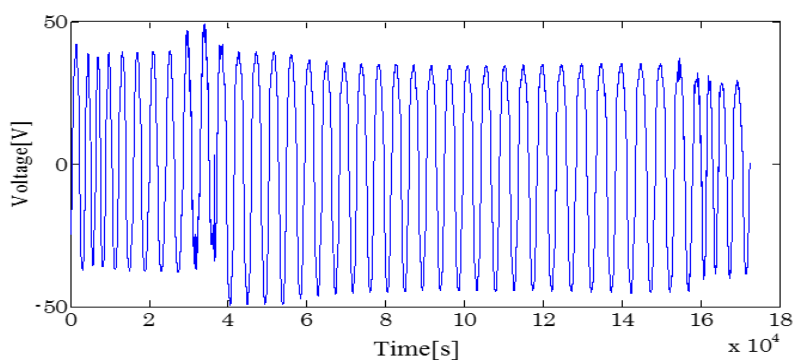
(b) 出力電圧波形

図 4.11 繰り返し荷重試験におけるモニタリング波形(3.04 N 入力時)

図 4.12 に入力値が先端荷重換算で 3.33 N 時の先端変位と出力電圧の時間応答を示した。 4.0×10^4 s 付近で出力電圧波形に変化があることがわかる。 4.0×10^4 s 付近を拡大したものが図 4.13 である。前節の破壊したデバイスにおける結線位置の検討での出力電圧波形の様に、 3.0×10^4 s 付近からノイズの入ったような波形となっていることがわかる。ここで微細なクラックが入り始めていると考えられる。また、図 4.13 より 3.65×10^4 s で出力電圧の急激な変化があり、ここで破断したと判断した。



(a) 先端変位波形



(a) 出力電圧波形

図 4.12 繰り返し荷重試験におけるモニタリング波形(3.33 N 入力時)

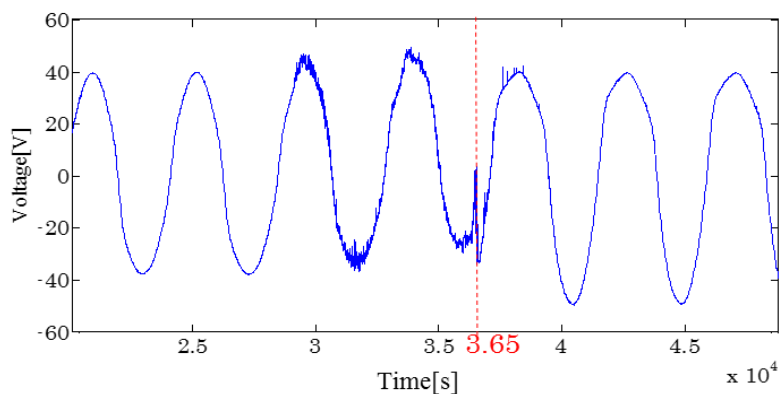


図 4.13 出力電圧モニタリング波形(図 4.12)の拡大図

図 4.14 に表 4.5 をプロットした図を示す。振動発電デバイスの開発において共通の入力として先端荷重を使用し $F-n$ 線図を作成した。この結果より、 10^7 回の疲労試験において先端荷重 3.33 N が破壊する最小値であることがわかった。そのため PZTC の疲労限度を破壊しなかった入力値の最大値である 3.04 N とした。今回の試験では鉄鋼系材料の疲労限度である 10^7 回で終了とした。しかしながら破壊した入力値の最小値である 3.33 N 時では、2117000 回で破壊している。これは図 4.14 を見ても明らかであるが実験終了した 10^7 回に近い値であることがわかる。このため実際に自動車に搭載する際は、先端荷重が最小値より十分小さい値になるよう制限する必要があると考えられる。

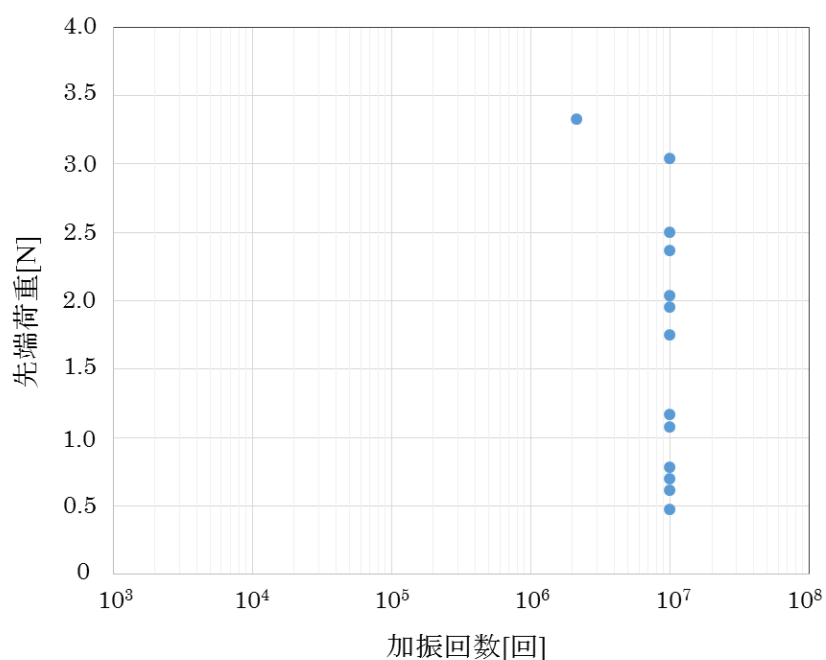


図 4.14 PZTC における $F-n$ 線図

4.5 自動車振動加振による歪測定試験

4.5.1 自動車振動について

本節では圧電素子 PZT C の先端におもりを付加した 1 質点デバイスに対し、自動車加振での歪測定試験を行う。自動車振動加振下における歪を測定し、前節で導出した PZT C の $F-n$ 線図と比較検証を行うことにより PZT C における安全性を確かめることが目的である。

使用した自動車振動は図 4.15 に示した HONDA オデッセイのエンジン付近(図 4.16)で計測した加速度振動で、走行路はワインディングロードである。自動車振動の計測やステージでの振動再現手法は、「多軸ステージによる自動車振動の高精度再現手法に関する研究」⁽¹³⁾を参照されたい。実際に計測した鉛直方向加速度の時間応答波形を図 4.17、パワースペクトル密度を図 4.18 に示す。図 4.18 より、共振周波数は 50Hz であり、40～70Hz の帯域で発電が見込めると考えられる。



図 4.15 使用した車両(HONDA オデッセイ)



図 4.16 計測位置(エンジン付近)

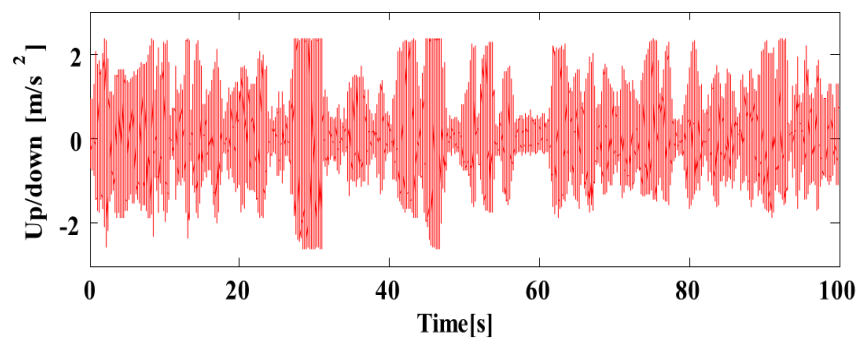


図 4.17 加速度時間応答(鉛直方向)

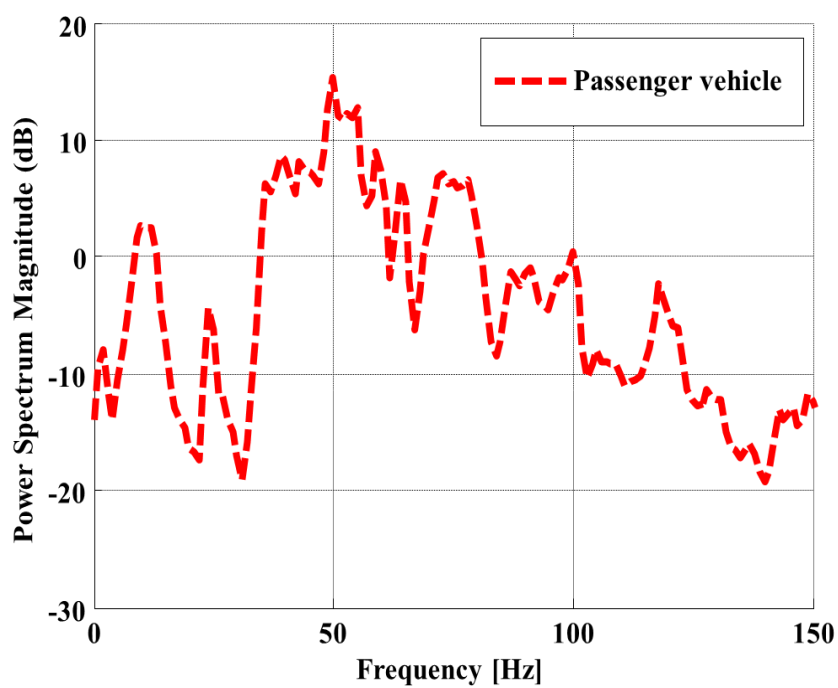


図 4.18 加速度パワースペクトル密度(鉛直方向)

4.5.2 自動車振動加振試験条件

前節に示した自動車振動を使用し、歪測定試験を行った。試験条件を表 4.6 に示す。PZT C に本実験で使用する自動車振動の発電帯域である 40～70 Hz と固有周波数が一致するようにおもりを先端に固定する。先端に 13 g のおもりを付加することで、共振周波数を 54 Hz とした。負荷抵抗は式(3.5)から、54 Hz 加振時に出力電力が最大になるようにマッチング抵抗 26 k Ω を負荷して試験を行った。試験装置写真を図 4.19 に示す。自動車振動を再現することのできる加振ステージに圧電素子を固定し、自動車振動を入力する。その際発生する出力電圧と歪を計測し耐久試験結果と比較することで耐久性の検討を行った。

表 4.6 自動車振動加振試験条件

試験条件	
試験方法	自動車振動加振試験
入力	自動車加速度振動
車種	HONDAオデッセイ
走行路	ワインディングロード
振動源	エンジン付近
加振方向	鉛直方向
使用素子	PZT C
先端おもり	13 g
素子共振周波数	54 Hz
負荷抵抗	26 k Ω
計測パラメータ	ベース加速度[G]
	出力電圧[V]
	歪[μ ST]
歪ゲージ	東京測器FLA-2-23
サンプリング時間	500 μ s
使用機材	マルチ入力データロガー(NR-600)
	高速アナログ計測ユニット(NR-HA08)
	高速高電圧計測ユニット(NR-HV04)
	ひずみ計測ユニット(NR-ST04)

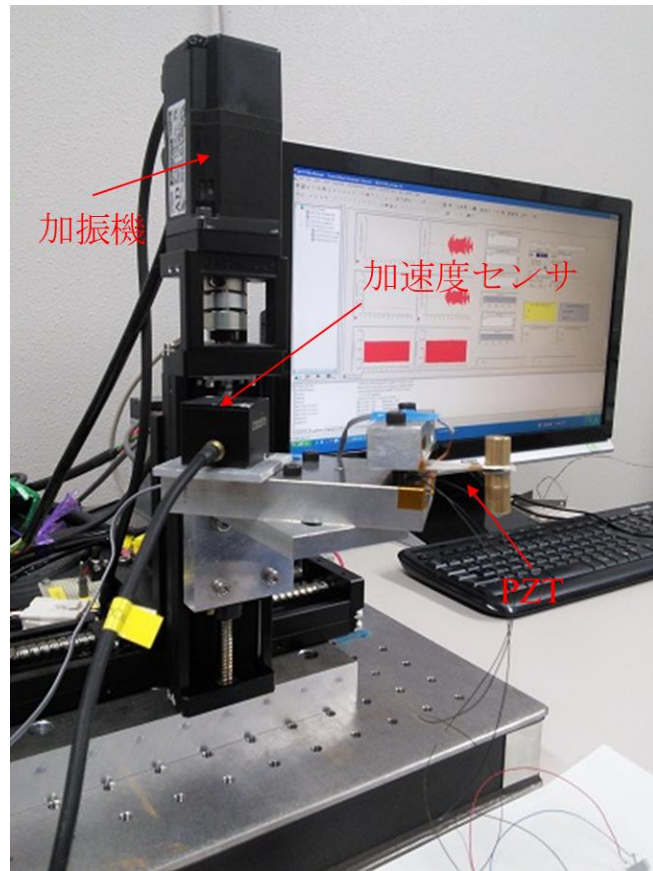


図 4.19 自動車加振試験装置

4.5.3 自動車振動加振試験結果

自動車加振試験のベース加速度、固定端歪、出力電圧の出力波形を図 4.20 に示す。これにより、最大固定端歪 $771.4\ \mu\text{ST}$ となった。この結果より、式(4.1)の校正式にて最大先端荷重は $1.38\ \text{N}$ となることがわかる。また、振動開始から終了までの 100 秒間での絶対値平均は、平均固定端歪 $100.0\ \mu\text{ST}$ となり平均先端荷重は $0.223\ \text{N}$ となった。耐久試験より、PZT C が疲労限度は $3.04\ \text{N}$ であるため、自動車加振での最大値はその $45.3\ \%$ であり十分小さい値であると言える。しかし、これはワインディングロードを一定速度で走行した場合の振動であり、段差を乗り上げた際の振動などで破壊する歪に到達することも考えられる。そのため先端の振幅を制限するような機構を搭載する必要があると考えられる。

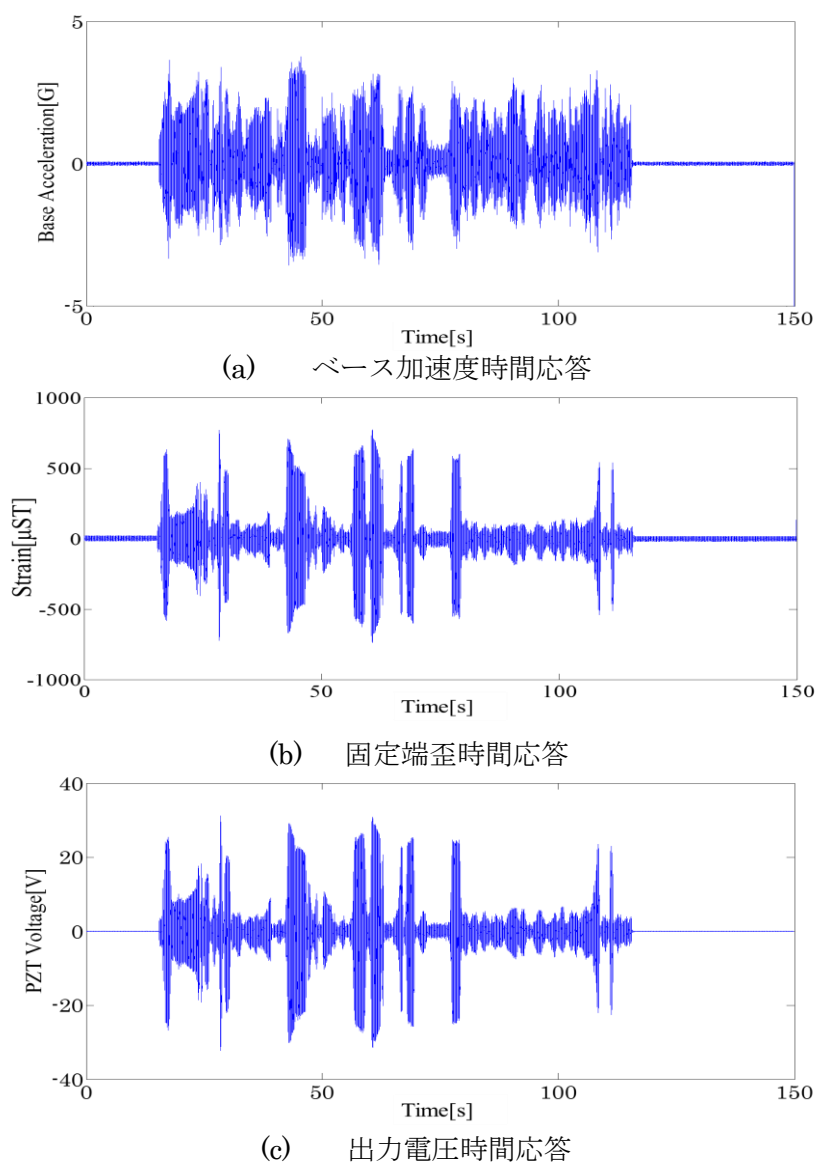


図 4.20 自動車加振試出力波形

また、PZT の出力は、最大電圧 31.2 V、最大電力 40 mW、総エネルギー0.21 J、振動開始から終了までの 100 秒間での平均値は平均電力 2.1 mW となった。無線送信機器を使用し一度温度情報を送信するために必要なエネルギーが約 0.4 μJ ⁽¹⁸⁾であるため、送信することは可能であることがわかる。しかしながら電圧波形を見ればわかる通り、出力の大きい部分と小さい部分の差が大きく安定的に動作させることは難しいと考えられる。そのため、発電に有効な帯域をできるだけ広く使用できる構造の提案が必要である。

第5章 まとめ

本研究では圧電素子の弱点である発電出力と耐久性の低さを改善することを目的とし、実用化に向けた圧電素子の開発を行った。まず、市販の圧電素子を使用し、1 質点デバイス、2 質点デバイスのシステム同定実験を行った。この実験に伴い、同形状のモデルを CAD ソフト上で作成し応力分布と出力電圧の周波数応答との比較を行った。その結果、板バネの中ほどで曲げと引っ張り面が反転している振動モードでは出力電圧が相殺し出力が低下することがわかった。これより応力分布が出力電圧に大きく関わってくることを確認した。この結果に基づき、応力分布の異なる 3 種類の圧電素子を製作し発電出力の比較検証を行った。この結果、応力分布が発電に有効な面積において均一である台形形状の圧電素子(PZT C)が最大効率 27.4%で発電することがわかった。また、台形形状の圧電素子において圧電材料の厚さ違いに対し、出力電圧とその原理式との比較検証により、出力電圧は圧電材料の量よりも応力分布や減衰率などの機械的性質による影響が大きいことが確認できた。

この発電効率の高い PZT C を自動車振動にて実際に使用することを想定し、台形形状の圧電素子である PZT C に対して繰り返し荷重による耐久試験を行った。その結果、PZT C の疲労限度は固定端の歪で $2166 \mu\text{ST}$ 、先端荷重 3.04 N であることがわかった。これを基に、PZT C の先端におもりを固定した 1 質点デバイスに対する自動車振動(乗用車)加振実験を行った。その結果、検出した最大歪は $771.4 \mu\text{ST}$ で、先端荷重換算で 1.38 N であった。この値は、耐久試験により導出した先端荷重の最小値よりも十分小さい値(45%相当)であることが確認でき、自動車振動での使用に耐えうることがわかった。

以上の結果より、発電効率に優れた台形形状の圧電素子である PZT C による自動車への実用化は、耐久性に関しては十分なレベルであると考えられる。

本研究では応力分布による発電効率の検証と、それに基づき作成した発電デバイスの耐久性に対する検証法を提案した。本研究が、より効率的で高耐久なデバイス開発への一助となれば幸いである。

今後の実用化における課題として、本研究で検証を行ったのは曲げモードにおける荷重であり、予想外の振動モード(例えばねじれモード)や衝撃荷重が加わった時の耐久性は考慮していない。そのため、安全率の導入やこれらの問題を軽減ないしは無効にするような機構の導入が必要と考えられる。また、現状のデバイスでは 1 つの周波数でしか発電できないため発電に有効な周波数帯域を少しでも広げる機構の開発も必要である。

平成 27 年度 修士公聴会 質疑応答

石川先生

Q. 多モード化はしないのか？

A. 本研究で PZT C の耐久性を検証するため、単体での試験を行った。PZT C 単体での耐久性がわかれば、多モード化した場合でも単体での疲労限度を適応することができると考えられる。

Q. 疲労試験で破壊後の方が電圧のピークツーピークが大きい、なぜか？

A. 素子が破壊しても発電できるが、破壊することばね定数が低下し共振周波数が低下したことが考えられる。それにより加振周波数とより共振周波数が近づき出力電圧が高くなったと考えられる。

Q. l, b を変化させて実験はしないのか、また l はなぜ伸ばせないのか。

A. PZT A, PZT B での比較が l, b の変化させている。 l の大きい PZT B は入力荷重に対する入力エネルギーが大きいため最大電圧も高くなる。それに対し b の大きい PZT A は入力荷重に対する最大電圧は小さくなり、出力電圧式と等しい特性を持っている。また、 l を伸ばせば荷重に対する最大電圧は大きくなるが固定端により大きな応力がかかり破壊しやすくなることが考えられる。

高橋俊樹先生

Q. 疲労試験にて、割れていることを確認したのか。

A. クラックは目視で確認できるため、試験後に確認を行っている。

Q. 破壊はリアルタイムで検知できるのか。

A. クラックの入った素子は健全な素子と比べ明らかに異なった電圧波形であるため、クラックが入った直後に検出できると考えられる。

Q. 四角形状の方がよいという結果があったがどういうことか。

A. 素子表面の最大応力が広くかかる素子が回生効率が高く発電できるため、最大応力である固定端が PZT B の 2 倍の長さである PZT A が高効率となったと考えられる。

参考文献

- (1) 環境省：「第4次環境基本計画」、環境省ホームページ、
https://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/plan/plan_4.html
- (2) 環境省：「日本の温室効果ガス排出量の算出結果(2013年度)」、環境省ホームページ、
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/>
- (3) 永井伸幸：「自動車振動に対する多モード振動発電デバイスの開発」、平成24年電気学会全国大会講演論文集、7-002 (2012)
- (4) 速水浩平：「振動発電のすべて」、日本実業出版社(2008)
- (5) 速水浩平：「振動発電の応用技術 ～「床発電」の原理と商品化事例～」、応用物理、Vol.79、No.9、pp846-847(2010)
- (6) 石橋正：「金属の強さ」、養賢堂(1970)
- (7) 橋本誠司：「柔軟構造物のアクティブ制振制御に関する研究」、宇都宮大学大学院、博士論文(1999)
- (8) S.Hashimoto, N.Nagai, Y.Fujikura, J.Takahashi, S.Kumagai, M.Kasai, K.Suto and H.Okada, 「Multi-Mode Vibration-Based Power Generation for Automobiles」, Proc of The 2012 IEEE-IAS Annual Meeting, PSEC-249
- (9) Seiji Hashimoto, Nobuyuki Nagai, Yoshimitsu Fujikura, Junpei Takahashi, Shunji Kumagai, Makoto Kasai, Kenji Suto, Hiroaki Okada 「A Multi-Mode Vibration-Based Power Generator for Vehicles」 Seiji Hashimoto et al., 2012, Applied Mechanics and Materials, 251, p124
- (10) Shunji Kumagai, Kenji Suto, Hiroaki Okada, Makoto Kasai, Seiji Hashimoto, Nobuyuki Nagai, Yoshimitsu Fujikura, Junpei Takahashi 「Multi-Axis Vibration Power Generation Device for Automobiles」 Shunji Kumagai et al., 2012, Applied Mechanics and Materials, 251, p119-123
- (11) 熊谷俊司：「自動車振動向け発電デバイスの開発」、電気研究発表会資料、p225-226(2012)
- (12) 安達和彦、坂本達哉：「圧電コンポジットを用いた振動発電装置のエネルギー変換効率に関する研究」、日本機械学会論文集(C編)Vol.78、No.789(2012)
- (13) 足立修一：「MATLABによる制御のためのシステム同定」、電気代出版社(2007)
- (14) 足立修一：「MATLABによる制御のための上級システム同定」、電気代出版社(2004)

- (15) 三好俊郎：「有限要素法—構造要素の変形・破壊挙動の解析—」、実教出版株式会社(1976)
- (16) 中山秀太郎：「材料力学」、オーム社(1967)
- (17) 富士セラミックス：「圧電セラミック テクニカルハンドブック」、
www.fujicera.co.jp/product/j/01/10.pdf
- (18) 淡路創介：「圧電デバイスを用いた振動発電システム実用化に関する研究」、群馬大学大学院、修士論文(2015)
- (19) 川田雄一：「材料強度ハンドブック」、朝倉書店(1966)
- (20) 中村宏：「機械疲れ寿命算出法」、養賢堂(1976)
- (21) 渥美光：「材料力学Ⅱ」、森北出版(1977)
- (22) 高橋良宗：「多軸ステージによる自動車振動の高精度再現手法に関する研究」、群馬大学大学院、修士論文(2015)

発表論文

- (1) 坂本森太郎：「多モード形状による高出力振動発電のための応力解析と実験検証」、電気学会全国大会産業応用部門 Y-56(2014)
- (2) 坂本森太郎：「振動発電用圧電デバイスの形状効果に対する実験解析」、第 5 回電気学会群馬・栃木合同研究発表会 ETG-15-18(2015)

謝辞

最後に本論文をまとめるにあたり、様々な方々にお世話になったことに対してこの場を借りて感謝いたします。

まず本研究にあたり、多大なるご指導をいただきました橋本誠司准教授に厚く御礼申し上げます。そして主査、副査としてご指導いただきました石川赴夫教授、高橋俊樹准教授に深く感謝いたします。また、共同研究並びに研究指導していただきました株式会社ミツバの熊谷氏、須藤氏、岡田氏、奥野氏そして本間氏に深く感謝するとともに、ますますのご活躍をお祈りいたします。

最後に既卒である共同研究者の淡路氏、高橋潤平氏、自動車振動加振機の製作者である高橋良宗氏、そして研究に協力してくださった橋本研究室の皆様に心から感謝申し上げます。